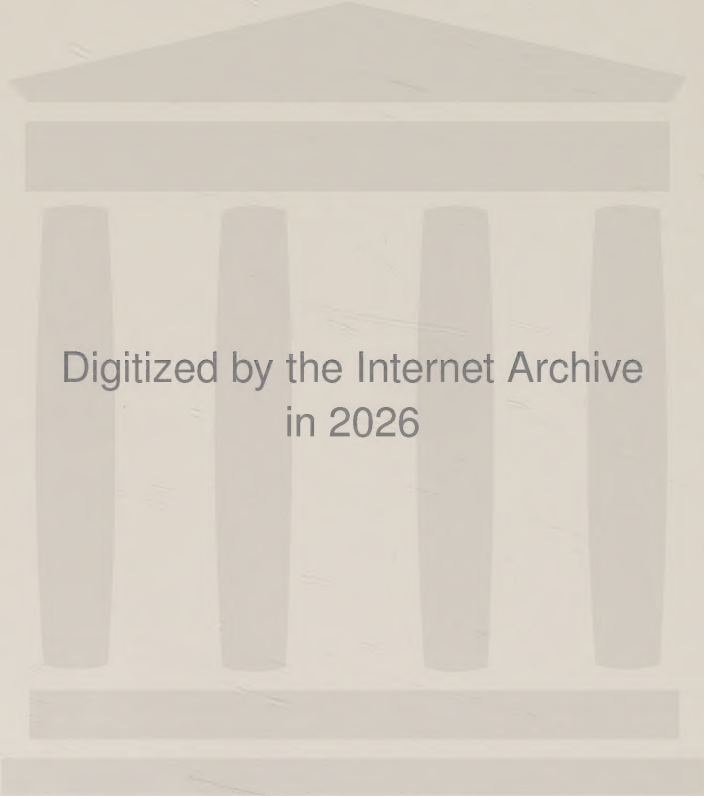


Der Einfluß von Schwefeldioxid auf Photosynthese- und Respirations- intensität bei *Petunia hybrida*

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
Ulfried Kühl
aus Altstädten/Allgäu

Gießen 1970



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545905_0032

Der Einfluß von Schwefeldioxid auf Photosynthese- und Respirations- intensität bei *Petunia hybrida*

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
Ulfried Kühl
aus Altstädten/Allgäu

Gießen 1970



D 26

Dekan: Prof. Dr. G. Eder

- I. Berichterstatter: Prof.Dr.L.Steubing
- II. Berichterstatter: Prof.Dr.D.v.Denffer

Tag der mündlichen Prüfung: 5.VI.1970

Für die Anregung zu dieser Arbeit danke ich Frau Professor Dr. L. Steubing, meiner hochverehrten Lehrerin, die mit stetem Interesse und großzügiger Unterstützung durch die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes und der notwendigen Mittel den Fortgang der Arbeit ermöglichte.

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	4
II.	Material und Methoden	12
1.	Anzucht der Versuchspflanzen	12
2.	Meßmethoden	12
a.)	Klimakammer	12
b.)	Dosierung und Messung von SO_2	16
c.)	CO_2 -Gaswechsellmessungen	19
d.)	Quantitative Schwefelanalyse	20
e.)	Quantitative Pigmentanalyse	20
III.	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	21
1.	Einstellung der SO_2 -Konzentration in der Begasungskammer	21
2.	SO_2 -Aufnahme der Petunien bei Belichtung und bei Dunkelheit	28
3.	CO_2 -Gaswechsel von <i>Petunia hybrida</i> unter dem Einfluß von Schwefeldioxid	30
A.	CO_2 -Umsatz unter 10 - 12 stündigem SO_2 -Einfluß	31
B.	CO_2 -Umsatz bei unterschiedlich langer SO_2 -Belastung	34
C.	Begasung in Dunkelversuchen	36
D.	Kurzfristige Stoßbegasungen	38
4.	Freilanduntersuchungen	43
IV.	Diskussion	54
V.	Zusammenfassung	61
VI.	Literaturverzeichnis	62

I. Einleitung

Jegliches Leben auf der Erde wird entscheidend von der Zusammensetzung der Luft beeinflusst. Das Problem der Luftverschmutzung stammt nicht erst aus jüngster Zeit, sondern schon aus früheren Jahrhunderten: so liegt bereits aus dem 13. Jahrhundert von Kaiser Friedrich II. ein Edikt über die Reinhaltung von Luft und Gewässern vor (GARBER, 1967).

Die wichtigsten heute auftretenden gasförmigen Verunreinigungen sind S-, N-, F- und C-haltig sowie Ozon und Oxydantien, die neben Aerosolen die Luft durchsetzen und sich auf das Leben von Mensch, Tier und Pflanze schädigend auswirken können.

Eine neue bis dahin unbekannte Art der Luftverschmutzung trat 1943 in Los Angeles auf. Sie wurde unter der Bezeichnung "smog" weltbekannt. Dies zeigt u. a., daß das Problem einer Reinhaltung der Luft sich eher ausweitete, als daß mit einer Abnahme zu rechnen ist. Die Luftverunreinigung ist zu einem entscheidenden Faktor für das Leben in den Ballungsgebieten der modernen Industrielandschaft geworden.

Für den Menschen sind geruchsbelästigende Wirkungen der Abgase neben den nachteiligen Auswirkungen der Aerosole auf die Luftwege von Bedeutung. Die Pflanzen werden durch toxisch wirkende Schadgase z. T. akut bedroht. Der Standort einer Pflanze wird nach WALTER (1960) durch den Strahlungshaushalt, den Wasserhaushalt sowie durch die wirksamen chemischen und mechanischen Faktoren charakterisiert. In Immissionsgebieten können chemische Faktoren durch Verunreinigungen in der Luft begrenzend auf die Vitalität der Vegetation wirken. Wie Erfahrungen gezeigt haben reagieren viele Pflanzen sehr empfindlich auf solche Luftverunreinigungen und zeigen dies durch akute Gesebeschäden an.

Die Wirkung von verschmutzter Luft kann am besten durch Kriterien beurteilt werden, die die Reaktion von Organismen auf Konzentration und Expositionszeit beschreiben (STERN, 1968). Für Pflanzen können vier Kriterien (MIDDLETON, EMIK, TAYLOR, 1965) herangezogen werden:

- 1.) Beeinflussung des Enzymsystems
- 2.) Chemische und physikalische Veränderungen in der Zelle
- 3.) Hemmung des Wachstums und verminderte Stoffproduktion
- 4.) Akute Gewebeschäden

Die Tatsache, daß sich heute Fachleute aus Gebieten wie Physik, Biologie, Technologie, Gesundheitswesen und Jurisprudenz mit dem Problem der verschmutzten Luft auseinandersetzen, zeigt wie schwierig es ist, Kriterien aufzustellen nach denen die Qualität der Luft beurteilt werden kann.

In den Anfängen der Rauchscha-densforschung beschränkte man sich mehr auf die Feststellung und Beschreibung von Tatsachen und man war nicht so sehr **bestrebt die direkte Ursache** für das Zustandekommen von Veränderungen festzustellen. Es galt vorwiegend die Schadwirkung von SO_2 auf die Vegetation zu erfassen, um Anhaltspunkte für die Höhe der Entschädigung zu erhalten, die nach den Gesetzen für Rauchscha-den zu zahlen waren. Die Ergebnisse dieser Frühphase der ökologischen Rauchscha-densforschung müssen als eine sehr wertvolle Vorarbeit angesehen werden, die nur eine erste Orientierung in der Vielfalt der Schadbilder erlaubt. Diese Vorarbeit ist heute so ziemlich abgeschlossen und die Weiterentwicklung hat zur experimentellen Immissionsökologie geführt. Ihre Aufgabe im Bereich der Immissionsforschung ist das Ausfindigmachen geeigneter Standorte und standortsangepaßter Kulturpflanzenrassen, die alle Erfordernisse erfüllen sollen. Zugleich sollen sie aber in weitgehender Harmonie zu ihrem Standort und ihrer näheren Umgebung stehen und nach Möglichkeit keinerlei Störungen durch biotische oder abiotische Schädigungen erleiden.

Inzwischen hat die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Pflanzenphysiologie und -ökologie die Voraussetzungen für weitergehendere Untersuchungen über die Wirkungsweise von Luftverschmutzung auf die Vegetation geschaffen. Die Kenntnis über Funktionsweise des Wasserhaushaltes und anderer Einzelvorgänge des gesamten Stoffwechsels der Pflanze in Abhängigkeit von Licht, Temperatur und Nährstoffangebot

sind die Ansatzpunkte für Untersuchungen über Ursache und Wirkung verschiedener Schadgaskomponenten. Die unterschiedliche Reaktion von Pflanzen auf Oxydantien unter scheinbar identischen atmosphärischen Bedingungen haben Wissenschaftler veranlaßt die wohlbekannten makroskopischen sichtbaren "smog-Schäden" mit physiologischen Prozessen in der Pflanze zu korrelieren (DUGGER, TAYLOR, CARDIFF and THOMPSON, 1962)

Schwefeldioxid - eine weit verbreitete und häufige Verunreinigung der Luft - wird von der Pflanze fast ausschließlich durch die Stomata aufgenommen (WIELER, 1916). ZAHN (1963) beschreibt die unterschiedliche Wirkung bei definierter SO_2 -Begasung aber unterschiedlicher Lichtintensität im Freiland. Durch Begasung mit radioaktivem S^{35}O_2 konnten WEIGL und ZIEGLER (1962) eine SO_2 -Anreicherung in den Schließzellen der Stomata sowie im Phloem nachweisen. Diese bevorzugte Anreicherung von SO_2 in den Schließzellen wird damit erklärt, daß das Schwefeldioxid vorwiegend die Spaltöffnungen passiert und die Oberflächen dieser Zellen verstärkt mit dem Gas in Berührung kommen. Mikroskopische Untersuchungen von HOLTE (1958) an immissionsgeschädigten Pflanzen erbrachten im Anfangsstadium eine Rötung der Stomata, die später bei weiterer SO_2 -Einwirkung zu einer starken Bräunung und Zerstörung der Stomata und der Nachbarzellen führt. Nur in geringen Mengen dringt SO_2 auch durch die Epidermis ins Blattinnere wenn die Kutikula noch sehr dünn ist. Wie LINSBAUER (1916) bereits gezeigt und in neuerer Zeit von MATERNA et al. (1963) beschrieben, erfolgt die Aufnahme nicht nur tagsüber bei geöffneten Stomata. Am stärksten wird im allgemeinen das Mesophyll durch SO_2 geschädigt.

Wohl die ersten Arbeiten über die Wirkung von schwefliger Säure auf die Vegetation sind von TURNER und CHRISTISON (1828) ausgeführt worden. Diese experimentellen Untersuchungen wurden von PAPPELHEIM (1865) und STOCKHARDT (1871) sowie von SCHROEDER et al. (1883) und WISLICENUS (1914) fortgesetzt. HASELHOFF (1918) berichtet über Beispiele von "Beschädigungen" der Vegetation durch SO_2 in verschiedenen Gebieten. Laubblätter bzw. Nadeln werden im Gegensatz zu den Blütenblättern leichter durch Schwefeldioxid geschädigt.

Die Untersuchungen von DÖRRIES (1932) und RÖBEN (1933) zeigen die Veränderungen des Chlorophylls unter SO_2 -Einfluß. Durch die Säureeinwirkung erfolgt der Abbau zu Phäophytin. Nach MÜLLER (1957) wird in rauchgeschädigten Pflanzen das Chlorophyll a schneller als Chlorophyll b abgebaut, so daß sich das Verhältnis von Chlorophyll a/b verschiebt (KLEE, 1969). Die Untersuchungen von ZINKERNAGEL (1938) zeigen, daß in einigen Fällen die Schädigung der Zellen durch SO_2 vor der Bildung von Phäophytin einsetzte. Nach ANDRÉ (1934) läßt der anfängliche Anstieg und die anschließende stetige Abnahme des osmotischen Wertes der Zellen auf eine direkte Einwirkung der Säure auf den Chloroplasten schließen.

THOMAS et. al. (1950) folgerten aus ihren Untersuchungen, daß die Schwefeldioxidaufnahme Oxydations-, Reduktions- und Neutralisationsvorgänge in den Pflanzenzellen bedingt. Bei geringer SO_2 Konzentration kann die Pflanze somit das durch die Stomata eingedrungene SO_2 abfangen und größten Teils als Sulfat in den Blättern festlegen. Dies ist aber nur innerhalb der Pufferkapazität möglich. Die Giftwirkung des SO_2 beruht mehr auf der reduzierenden Eigenschaft als auf der Acidität.

Wenige Untersuchungen über die Wirkung von SO_2 auf ernährungsphysiologisch wichtige Inhaltsstoffe liegen bisher vor. Einen verminderten Proteingehalt in rauchgeschädigtem Gras stellten RUSTON und CROWTHER (1910) fest. Der Rohfasergehalt ist dabei außergewöhnlich hoch. GUDERIAN und STRATMANN (1962) stellten dagegen weder bei Raps noch bei Luzerne eine Abhängigkeit des Asche-, Eiweiß-, Fett- und Rohfasergehaltes von der Immissionshöhe fest. Der Carotingehalt und die N-freien Extraktstoffe zeigen bei steigendem SO_2 -Angebot eine Abnahme.

MATERN (1961/1962) stellte bei Begasungsversuchen mit Schwefeldioxid und in rauchgeschädigten Waldbeständen eine signifikante Erhöhung des Kieselsäuregehaltes von Fichtennadeln fest. Dies dürfte vermutlich durch die erhöhte Transpiration bedingt sein. Unterschiedliche Widerstandsfähigkeit einzelner Fichtenindividuen gegen Immissionen steht nicht mit der mineralischen Zusammensetzung der Nadeln in Beziehung.

DÄSSLER (1962) untersuchte den Einfluß von SO_2 auf die Wirkung der Peroxydase und die Glukosidase. Über die Einwirkung von SO_2 auf das Ferment Diastase hat WIELER (1905) gearbeitet. Dabei hat er daraufhingewiesen, daß die Stärkeableitung aus geschädigten Pflanzen wesentlich langsamer erfolgt. Ob diese Ansicht zu Recht besteht ist nicht endgültig bewiesen.

Das Verhalten von Luzerne und Gerste bei niederen SO_2 -Konzentrationen prüfte KATZ (1949). Signifikante Änderungen in der chemischen Zusammensetzung konnten nicht beobachtet werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kam BORTITZ (1964) aufgrund von Begasungsversuchen an Fichten. Bei letaler Schädigung der Fichten- bzw. Kiefernadeln konnten VOGL, BÖRTITZ und POLSTER (1964) eine Erhöhung des prozentualen Trockengewichtes und ein Ansteigen der Konzentration zellsaftlöslicher Inhaltsstoffe nachweisen.

Der Wasserhaushalt von SO_2 -beeinflussten Geweben wurde bereits mehrfach untersucht. Die sich widersprechenden Ergebnisse beruhen auf der unterschiedlichen Höhe der angebotenen SO_2 -Konzentration.

Klare Vorstellungen über die Transpiration unter SO_2 -Einfluß erbrachten die Untersuchungen von HEILING (1933). Von ihr wird die SO_2 -Einwirkung zeitlich in drei Phasen erfaßt:

- 1.) "Stimulation der wirklichen Transpiration"
- 2.) "Letale Erhöhung der Wasserabgabe"
- 3.) "Erniedrigung derselben nach Zerstörung des osmotischen Potentials und Beendigung des Vertrocknungsvorganges"

Nach KELLER und MÜLLER (1958) tritt zunächst eine gut wahrnehmbare Überhöhung der Transpiration an SO_2 -begasten Pflanzen auf. Als Grund hierfür wird eine Umladungswirkung der Plasmaproteine angeführt, die die Transpirationswiderstände verringert. Auf diese Weise wird gebundenes Wasser frei. Dies bewirkt die vorübergehende Transpirationssteigerung. Die daraus resultierende Verringerung der Plasmahydratisierung ruft eine Erhöhung der Transpirationswiderstände hervor und die

Wasserabgabe sinkt stark ab. Die Pflanze kann dann nicht mehr die notwendigen Wassermengen aufnehmen und vertrocknet langsam.

Die Beeinflussung der Assimilation durch SO_2 kann nur durch Gaswechselversuche erfaßt werden. WIELER (1905) hat als erster solche Versuche durchgeführt. Aber erst durch die moderne Meßtechnik sind dem Pflanzenphysiologen Möglichkeiten gegeben mit voll automatischen und kontinuierlich registrierenden CO_2 -Meßgeräten diese Fragestellung zu bearbeiten. Hier sind auf dem Gebiet immissionsbeeinflusster Assimilationstätigkeit der Pflanzen vor allem die Versuche von KELLER und MÜLLER (1958) und VOGL, BÖRTITZ und POLSTER (1964), die an Forstpflanzen ausgeführt wurden, zu nennen. Bei diesen Untersuchungen wurde zur Messung und Registrierung des CO_2 -Gehaltes von Außenluft und Begasungsküvette der Ultrarot-Absorptionsschreiber (URAS) eingesetzt. Die Untersuchungen an Forstpflanzen zeigen, daß diese gegenüber einer SO_2 -Behandlung um so empfindlicher reagieren, je stärker ihre Assimilationstätigkeit ist. Da diese Experimente im Freiland und z. T. im Gewächshaus ausgeführt wurden, gehen noch das Licht und die Temperatur als wechselnde Parameter in die Befunde ein, sofern die Luftfeuchte in den Küvetten konstant blieb. Die Freilandversuche wurden an einzelnen Zweigen von Nadelbäumen (Fichte, Kiefer) ausgeführt, während die Gewächshausversuche an jungen zweijährigen gepfropften Topfpflanzen von *Abies alba*, *Picea abies* und *Pinus sylvestris* ausgeführt wurden.

An Tagen mit wechselnder Witterung, an denen die Assimilationstätigkeit herabgesetzt ist, wird auch der Einfluß einer SO_2 -Begasung weit weniger wirksam als an Schönwettertagen. VOGL, BÖRTITZ und POLSTER (1964) berichten, daß bereits durch einen ersten SO_2 -Stoß die Nettoassimilation der Versuchskiefer stark fällt. Trotz dieser physiologischen Schädigung reagiert die Pflanze auf die Unterbrechung der SO_2 -Begasung verhältnismäßig rasch mit einer geringen Erholung. Bei abnehmender Nettoassimilation geht auch die SO_2 -Absorption zurück und bei Dunkelheit fällt die SO_2 -Absorption auf ein Minimum. Bei erneut einsetzender Belichtung steigt sie mit der Assimilation wieder an. Dies ist aber nur für ungeschädigte oder schwach

geschädigte Pflanzen zutreffend, deren Stomata noch zur Regulation fähig sind.

Zur Kennzeichnung beginnender Immissionsschädigungen durch SO_2 hat KELLER (1958) bei Koniferen das unterschiedliche Assimilationsvermögen benutzt. Für diesen empfindlichen Rauchscha-denstest führte er den Begriff "URAS-Test" ein. Will man außer der herabgesetzten Assimilation auch die anfänglich stimulierte Transpiration erfassen und berechnet das Verhältnis beider Vorgänge, so ergibt sich die "Produktivität der Transpiration". Der Quotient Assimilation/Transpiration ist nach KELLER eine Möglichkeit das Ausmaß der SO_2 -Schädigung von beeinflussten Pflanzen zu beurteilen, wenn zum Vergleich die "Produktivität der Transpiration" von unbegasten Pflanzen herangezogen wird.

Quantitative Beziehungen zwischen SO_2 -Immissionen und Wirkung versuchte VAN HAUT (1961) aufzugliedern. Diese Experimente wurden in Klimakammern durchgeführt, um alle Einflußgrößen bis auf die zu untersuchende konstant zu halten. Bei diesen Versuchen wurde als Wirkungskriterium vor allem der Grad der Nekrotisierung begaster Pflanzenteile herangezogen.

Bei den eigenen hier dargelegten Untersuchungen sollte die Beeinflussung des CO_2 -Gaswechsels als Kriterium für die Wirkung von Schwefeldioxid im Vordergrund stehen und erst bei länger andauernder Begasung mit geringen Konzentrationen bzw. kurzfristiger SO_2 -Stoßbegasung wurde zusätzlich die Ausbildung von Nekrosen berücksichtigt.

Bei der Wahl des Versuchsobjektes - *Petunia hybrida* - wurden praktische Erfahrungen, die bei der Gestaltung und Bepflanzung des Frankfurter Stadtgebietes jahrelang gesammelt wurden berücksichtigt. Petunien werden nicht nur in Parkanlagen, sondern auch in Schalen und Kästen in der modernen Steinwüste einer Großstadt zur Auflockerung und Belebung ausgepflanzt. Jedoch haben Erfahrungen gezeigt, daß an Plätzen mit hoher Luftverschmutzung trotz guter Pflege Petunien nicht mehr gedeihen und verkümmern.

Um die Reaktion nicht einzelner Individuen oder gar nur ein-

zelner Pflanzenteile zu erfassen, wurden die Versuche so geplant und ausgeführt, daß jeweils mit 20 Individuen gearbeitet werden konnte. So wurde der Einfluß von eventuell abweichenden Reaktionen einzelner Pflanzen auf das Gesamtbild der SO_2 -Wirkung auf den CO_2 -Gaswechsel von *Petunia hybrida* auf ein Minimum reduziert, denn die in dieser Arbeit besprochenen Befunde beruhen auf einem breiten Fundament von Pflanzenmaterial.

II. Material und Methoden

1.) Anzucht der Versuchspflanzen

Einheitliches und untereinander vergleichbares Pflanzenmaterial für die Versuche wurde durch Petunien F₁-Hybrid-Saatgut (Blue Magic, White Magic, Red Cascade) von BANARY erreicht. Die Anzucht erfolgte unter definierten Bedingungen in einem Kammergewächshaus mit Taschenklappen und automatischer Klimasteuerung. Im Winterhalbjahr wurden zur Einhaltung des Langtages von 16 Stunden Licht zusätzlich Quecksilberhochdrucklampen (400 W; HQL von Osram) eingesetzt.

Die Aussaat der Petunien erfolgte in einem Sand/Torf Gemisch (1:1). Die zehn Tage alten Keimlinge wurden dann in Schalen pikiert und nach weiteren 14 Tagen in Töpfe mit Einheitserde vereinzelt. Für Versuchszwecke wurden jeweils 6 - 8 Wochen alte Pflanzen verwendet, die gerade zu diesem Zeitpunkt im Stadium der Blütenbildung waren.

2.) Meßmethoden

a.) Klimakammer

Die gesamten Begasungsexperimente wurden in einer Klimakammer der Firma WEISS (Giessen) durchgeführt (Abb.1). Hierdurch war es möglich unter konstanten und genau definierten Versuchsbedingungen zu arbeiten.

Die Begasungskammer hat bei einer Grundfläche von 60 cm mal 60 cm ein Volumen von 300 Liter. Der Innenraum ist ganz mit V4a-Blech ausgekleidet. Nur die Deckenscheibe und die Tür sind aus Plexiglas. Auf diese Weise ist eine Korrosion sowie Absorption von Schwefeldioxid ausgeschlossen. Bei gleichbleibender Schadgasdosierung kann somit jegliche Konzentrationsänderung im Innern der Kammer auf pflanzliche Reaktion zurückgeführt werden. Unmittelbar vor Eintritt der klimatisierten Frischluft in die Kammer wird die gewünschte SO₂-Menge zudosiert. Über die Programmscheiben von zwei Reglern wird die Temperatur und die Luftfeuchte eingestellt. Dabei kann innerhalb des Arbeitsbereiches der Klimaaggregate (-10°C bis +40°C) jeder beliebige Verlauf sowie Kombination von Temperatur und Luftfeuchte (bis 95 % rel. Feuchte) eingestellt werden. Die klimatisierte Frischluft, die nach dem Taupunktprinzip aufbereitet wird, strömt im oberen Teil unter der Deckenscheibe in die Kammer und überstreicht von oben nach unten die Pflanzen bevor sie durch den Lochboden wieder die Kammer verlässt. Die Frischlufttrate kann im Bereich von 3 m³/h bis 30 m³/h stufenlos anhand von Strömungsmessern mit Ventilen reguliert werden. Dies entspricht einer 10 - 100fachen Luftwechselrate.

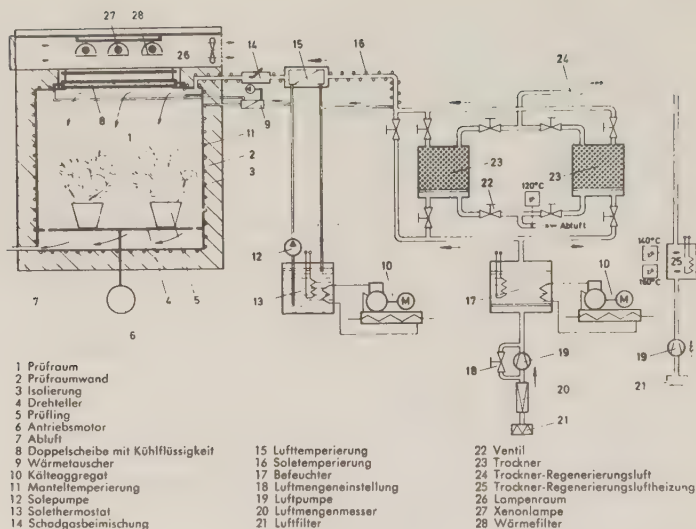


Abb. 1

Übersichtsplan der Klimakammer für Begasungsversuche
(aus: Druckschrift Nr.KP 7.0.0.1/26691 der Fa. WEISS)

Das breite Band der Luftmengensteuerung ermöglicht entsprechend der jeweiligen Versuchsfragestellung den Luftdurchsatz und damit Temperatur, Feuchte und Schadgaskonzentration einzustellen. Einerseits ist für eine möglichst geringe Abweichung des Klimasollwertes vom -Istwert eine hohe Lufrate notwendig, um dadurch die Störgröße der pflanzlichen Transpiration auf ein Minimum zu reduzieren, andererseits ist eine kleine Luftwechselrate für Gaswechselmessungen von Vorteil, um Änderungen des CO_2 -Gehaltes schnell und gut erfassen zu können.

Bei zehnfachem Luftwechsel wurde zusätzlich in der Kammer ein Ventilator eingesetzt. Auf diese Weise wurde eine gute und gleichmäßige Vermischung der zugeführten Frischluft erreicht. Dies ist bei entsprechend hohem Luftwechsel nicht erforderlich, da die Verweildauer schnell abnimmt. Bei einem Luftdurchsatz von $3\text{m}^3/\text{h}$ ist erst nach 6 Minuten im Prüfraum die Luft erneuert, während sie bei $30\text{m}^3/\text{h}$ bereits nach 0,6 Minuten in der Kammer ausgewechselt ist. Da die gewünschte relative Luftfeuchte nach dem Taupunktprinzip und nicht durch Einsprühen von flüssigem Wasser in den Prüfraum eingestellt wird, ist die Befeuchtung aerosolfrei. Dies ist besonders zur Prüfung von Schadgasen wichtig, um unter genau definierbarem Zustand der Luftverhältnisse zu arbeiten.

Durch das Prinzip der Manteltemperierung, d. h. die Wände der Kammer werden durch umlaufende Sole auf der Sollwerttemperatur

der zugeführten Frischluft gehalten, ist eine kondensatfreie Temperierung möglich, sofern mit einem 80 - 100fachen Luftdurchsatz gefahren wird. Bei geringeren Luftmengen macht sich die Transpiration der Pflanzen als Störgröße im Klimaregelskreis sehr bemerkbar. Dies trifft vor allem für Sollwerte, die über 75 % rel. Feuchte liegen zu. Je nach der Transpiration übersteigt der Istwert den Sollwert um 10 % bis 20 %, so daß es zur Kondensatbildung kommen kann. Wird der Sollwert der relativen Luftfeuchte unter Berücksichtigung der pflanzlichen Transpiration auf entsprechend niedrige Werte eingestellt, so wird sehr schnell im Innern der Kammer ein konstanter Istwert erreicht ohne daß dabei Kondensat gebildet wird. Es kann unter diesen Umständen eine relative Luftfeuchte bis zu 95 % konstant eingeregelt werden.

So wurde bei den Gaswechselversuchen über die Programmscheibe ein Sollwert von 35 % relativer Feuchte eingestellt. Bei zehnfachem Luftwechsel wurde durch die Transpiration der Pflanzen jedoch ein Istwert von 41 % rel. Feuchte im Dunkeln und 43 % im Licht registriert. Bei 70fachem Luftwechsel macht sich die Störgröße der pflanzlichen Transpiration kaum noch bemerkbar. Hierbei wurde bei einem Sollwert von 35 % rel. Feuchte im Dunkeln bei gleicher Blattmasse 36 % und im Licht 38 % rel. Feuchte registriert.

Als Lichtquelle ist über der Kammer eine wassergekühlte 2,5 kW Xenonlampe eingebaut. Die Wärmestrahlung wird durch ein Wärmeschutzfilter und durch eine wassergekühlte Flexiglasküvette, die die Decke der Begasungskammer bildet, abgeführt. Auf diese Weise wird die Sollwerttemperatur im Prüfraum nach dem Zünden der Lampe um 3° C überschritten. Dieser Temperaturfaktor muß dann beim Aufstellen eines genauen Klimaprogrammes einbezogen werden. Um diese 3° C Temperaturerhöhung durch die Lampenwärme zu vermeiden, ist ein Luftwechsel erforderlich, der aus Gründen der Betriebskosten nicht realisierbar wäre. Die Beleuchtungsstärke der Xenonlampe (Abb. 2) kann über einen Regeltrafo mit Prozenteinteilung verändert werden.

**Beleuchtungsstärke bei verschiedenen Regel-
trafostellungen Xenonlampe 25 KW
wassergekühlt**

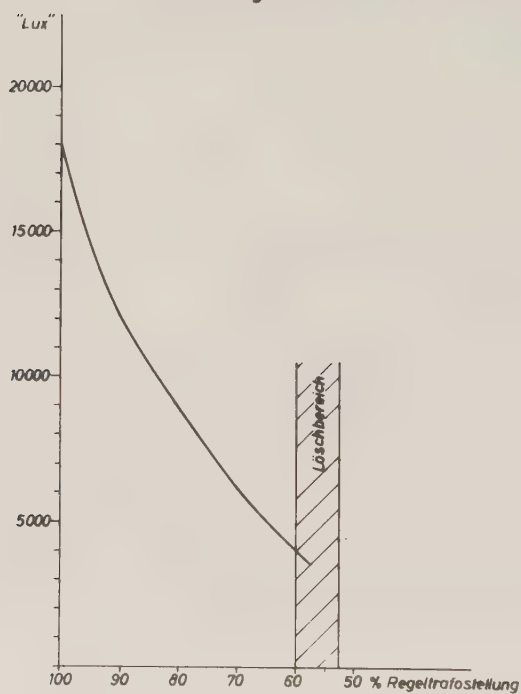


Abb. 2

Lichteinstrahlung der Xenonlampe im Innern der
Klimakammer.

b.) Dosierung und Messung von Schwefeldioxid.

Die Anordnung der SO_2 -Dosierung ist aus Abb. 4 zu ersehen. Bei der Versuchsdurchführung hat sich die Dosierpumpe 411/250-G von TELAB (Homberg) zur kontinuierlichen Dosierung von Schwefeldioxid in den Frischluftstrom der Klimakammer sehr gut bewährt.

Das Gas wird einer Bombe mit 100 %tigem SO_2 entnommen. Durch zwei Nadelventile wird der Gasstrom so reduziert, daß nur eine sehr geringe Anzahl an Gasblasen über die Wasserabtauchung des Druckkonstanthalters entweichen und im Wasser gelöst werden. Über diese Abtauchung, in der der Gasüberschuß gelöst wird, kann ein konstanter Eingangsdruck in mm WS unter dem das Gas in die Dosierpumpe gelangt eingestellt werden.

Das Prinzip dieser Dosierpumpe beruht auf der Volumensänderung einer Teflonkammer, die durch die einstellbare Bewegung einer Teflonmembrane hervorgerufen wird. Dabei werden die Ventile zusammen mit der Membranbewegung von einer Nockenwelle gesteuert, die von einem Synchronmotor angetrieben wird. Die in einer bestimmten Zeiteinheit geförderte Gasmenge wird mit der Hubverstellung der Membrane geregelt. Die Anzeige erfolgt auf einer Kreisskala mit einer relativen Einteilung von 0 - 270 Grad. Die Hubstellung der Membran ist linear, so kann die Anzeige auch linear interpoliert werden. Zusätzlich kann die Hubanzahl pro Minute d. h. der Umlauf der Nockenwelle pro Minute über einen 3-Stufenschalter im Verhältnis 1:2:4 auf 24, 12 oder 6 Hübe/Minute eingestellt werden. Bei gleichbleibender Membranstellung (gleichem Hubvolumen) wird entweder die Hälfte (12 Hübe/Minute) oder nur ein Viertel (6 Hübe/Minute) von der Menge gefördert, die bei 24 Hüben/Minute dosiert wird. Durch die beiden Variablen (lineare Änderung des Hubvolumens; Hubzahl pro Minute) kann ohne Änderung des Luftdurchsatzes innerhalb des Bereiches der Immissionskonzentrationen Schwefeldioxid reproduzierbar dosiert werden.

Zur Berechnung der theoretischen Schadgaskonzentration im Innern der Kammer dient eine Eichkurve. Diese wird mit einer Flüssigkeit (z.B. Propanol) ermittelt, da sich die geförderte Flüssigkeitsmenge pro Zeiteinheit leichter und genauer volumetrisch bestimmen läßt. So wird aufgrund der Linearität des Hubvolumens einmal im unteren z.B. bei 30 Grad und einmal im oberen Skalenbereich z. B. bei 270 Grad das geförderte Volumen pro Zeiteinheit bei 24 Hüben pro Minute bestimmt und in einem Diagramm (Abb. 3) als Eichkurve eingetragen. Daraus

kann jede andere Fördermenge unter Berücksichtigung der eingestellten Hubzahl pro Minute abgelesen werden.

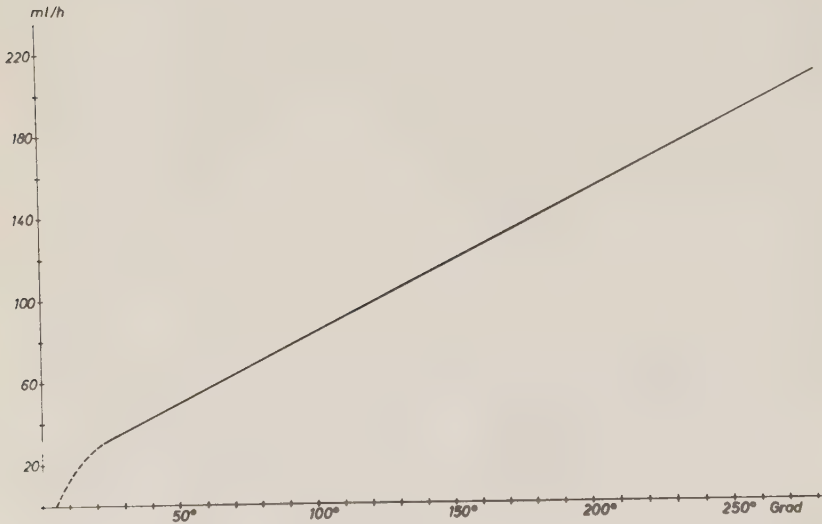


Abb. 3

Eichkurve für die Förderleistung der Dosierpumpe 411/250-G von TELAB bei einer Hubzahl von 24/Minute. Die geförderte Gasmenge hängt vom Hubvolumen ab, das auf einer Kreisskala (0 - 270 Grad) eingestellt wird.

Die Schwefeldioxidkonzentration im Innern der Begasungskammer wurde mit dem Analysator Ultrags U3S zur Bestimmung von SO_2 in Luft von H. WÖSTHOFF (Bochum) gemessen und registriert. Durch einen Teflonschlauch, der als Sonde in die Mitte der Kammer reichte, wurde unmittelbar über den Pflanzen die Luft für den Analysator (Abb. 4) angesaugt.

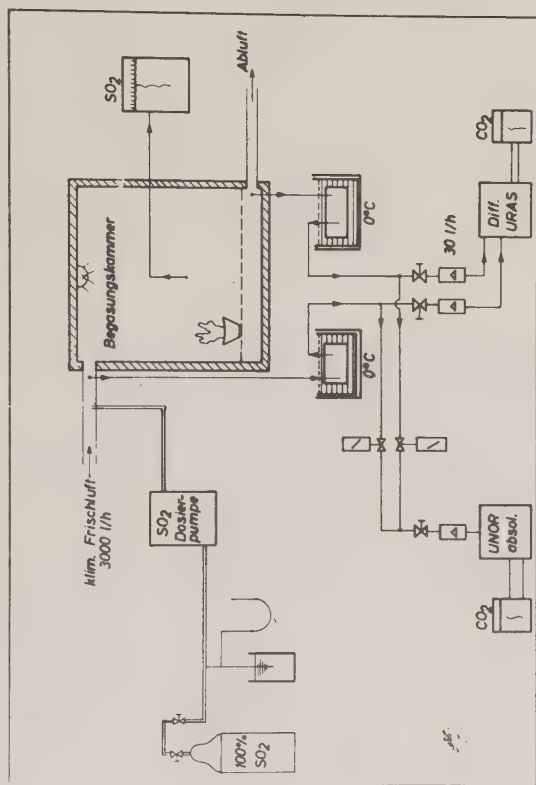


Abb. 4

Versuchsanordnung zur gleichzeitigen Begasung mit SO_2 sowie Messung und Registrierung des CO_2 -Gaswechsels der Testpflanzen.

c.) CO₂- Gaswechsellmessungen

Zur Erfassung des CO₂-Umsatzes der Versuchspflanzen wurde mit Infrarot-Gasanalysatoren gearbeitet. Einerseits wurde der Differenz-URAS von HARTMANN & BRAUN (Frankfurt) andererseits zur Registrierung des absoluten CO₂-Gehaltes der Luft der UNOR von MAIHAK (Hamburg) eingesetzt.

Das Meßprinzip dieser Infrarot-Gasanalysatoren beruht auf der Eigenschaft vieler Gase, so auch CO₂, ein Absorptionsspektrum im infraroten Wellenbereich aufzuweisen. Jedes Gas besitzt spezifische Banden innerhalb derer die Strahlung absorbiert wird. Die Arbeitsweise des Infrarot-Gasanalysators ist bereits von EGLE und ERNST (1949) sowie HUBER (1950), TRANQUILLINI (1952) und NUERNBERGK (1955) eingehend beschrieben worden, so daß an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden soll.

Die eine der beiden Meßküvetten im Differenz-URAS wurde mit dem Vergleichsgas (Außenluft) und die andere mit dem zu messenden Gasstrom aus der Klimakammer durchspült. Die Registrierung erfolgte über einen Punktschreiber. Zur Kontrolle des absoluten CO₂-Gehaltes der zugeführten Frischluft wurde über eine Schaltuhr und zwei Magnetventile gesteuert wechselweise die Außenluft und die Kammerluft durch die Küvette des UNOR geleitet. Das Prinzip der Versuchsanordnung zur CO₂-Umsatzmessung unter dem Einfluß von SO₂-Begasung wird in Abb. 4 dargestellt. Um die Querempfindlichkeit der CO₂-Meßgeräte gegenüber Wasserdampf auszuschalten wurden in die Gasmeßleitung Kühlfallen zum Austrocknen der Luft eingebaut. Dadurch wurde die Luftfeuchte mittels Eiswasser konstant bei 0°C ausgefroren.

Als Bezugsgröße für die CO₂-Umsatzmessungen wurde nach VOGL, BORTITZ und POLSTER (1964) das Trockengewicht, das jeweils nach Versuchsende von der Gesamtheit der 20 Versuchspflanzen bestimmt wurde, gewählt. Die CO₂-Werte wurden dann auf ein Gramm Trockengewicht umgerechnet.

d.) Quantitative Schwefelanalyse

Methoden für die Bestimmung des Schwefelgehaltes im Pflanzenmaterial sind von BUCK (1962), KESSEN (1963) und GARBER (1967) zusammengestellt worden.

Basierend auf dem Verfahren von GROTE und KREKELER (1933) wurde von JÄGER (1969) eine abgewandelte Methode entwickelt, nach der auch die hier verwendeten Pentunien aufgearbeitet wurden (JÄGER und STEUBING, im Druck). Bestimmt wurden im Pflanzenmaterial Gesamtschwefel, anorganischer und organischer Schwefel.

e.) Quantitative Pigmentanalyse

In Anlehnung an HAGER und MEYER-BERTENRATH (1966) wurden die Farbstoffkomponenten in den Blättern auf dünn-schichtchromatographischem Wege aufgetrennt. Es wurde sowohl verteilungs-chromatographisch als auch nach dem Prinzip der Adsorption gearbeitet.

Die Auftrennung und Bestimmung von Chlorophyll a und b erfolgte über eine Kieselgur-Kieselgel-Schicht während β -Carotin an einer Dünnschicht aus CaCO_3 , MgO und Ca(OH)_2 analysiert wurde. Die Analysenwerte wurden auf die Bezugsgröße von 1 g Trockengewicht umgerechnet.

III. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Jede experimentelle Fragestellung ist unter einem methodischen und unter einem fachspezifischen Gesichtspunkt zu sehen. So galt es zunächst das Begasungsexperiment aufgrund der neuen technischen Möglichkeiten kritisch zu prüfen bevor physio-ökologische Untersuchungen ausgeführt wurden.

1.) Einstellung der Schwefeldioxid-Konzentration in der Begasungskammer

Zu Beginn der eigenen Experimente stand das Problem einer exakten Bestimmung der SO_2 -Menge, die den Pflanzen bei der Begasung angeboten wird.

Wird die SO_2 -Konzentration in ppm bei Begasungsversuchen angegeben, so kann nur bei gleichzeitiger Angabe der Luftwechselrate die Menge an Schadgas bestimmt werden, die pro Zeiteinheit an den Pflanzen vorbeistreicht. Bei einem Kammervolumen von $0,3 \text{ m}^3$ liegt ein zehnfacher Luftwechsel vor, wenn stündlich 3 m^3 Luft durch den Prüfraum geleitet werden. Ein Luftdurchsatz von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bringt eine hundertfache Erneuerung des Luftvolumens in der Begasungskammer. Wird eine Schwefeldioxidmenge von $5,4 \text{ mg/m}^3$ in der Klimakammer registriert, so entspricht dies bei zehnfachem Luftwechsel ($3 \text{ m}^3/\text{h}$) $16,2 \text{ mg SO}_2$, die insgesamt stündlich durch die Kammer geleitet werden. Bei hundertfachem Luftwechsel ($30 \text{ m}^3/\text{h}$) bedeuten $5,4 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ jedoch eine SO_2 -Menge von 162 mg , die in einer Stunde durch die Kammer strömt. Für die Versuchspflanzen differiert mit dem Luftwechsel auch das quantitative SO_2 -Angebot wie der folgende Versuch beweist.

In Abbildung 5. A ist die zeitliche Änderung einer definierten Schwefeldioxidkonzentration im leeren Prüfraum und im Prüfraum mit 16 Pflanzen (Trockengewicht: $43,2 \text{ g}$; Oberfläche: $2,17 \text{ m}^2$) zu sehen. Die Endkonzentration für SO_2 war jeweils nach 150 Minuten erreicht. Sie differiert aber bei den beiden verschiedenen Versuchsanordnungen um $1,35 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft. Aus dieser Differenz kann der pflanzenbedingte SO_2 -Schwund berechnet werden. Dieser ist aus der Kurve der Abbildung 6 A ablesbar. Das Kurvenbild zeigt wie die anfänglich hohe SO_2 -

Aufnahme entsprechend dem hohen Angebot auf einen niedrigeren Wert sinkt.

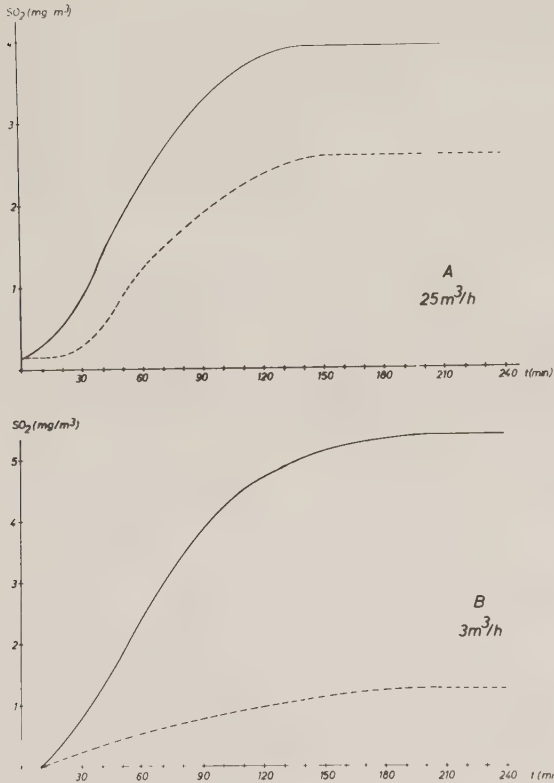


Abb. 5

Einstellung des Endwertes einer eingegebenen SO_2 -Konzentration im Prüfraum mit (-----) und ohne (——) Pflanzen bei einer Luftmenge von $25 \text{ m}^3/\text{h}$ und von $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dies deutet auf den Einfluß der Stomata bei der SO_2 -Aufnahme hin, deren Öffnungsvorgang über eine höher liegende Spaltenbreite zu einer geringeren konstanten Porenweite

unter gleichbleibenden Bedingungen führt (RASCHKE 1965; EHRLEK, NAKAYAMA and VAN BAVEL 1965; RASCHKE und KOHL 1969).

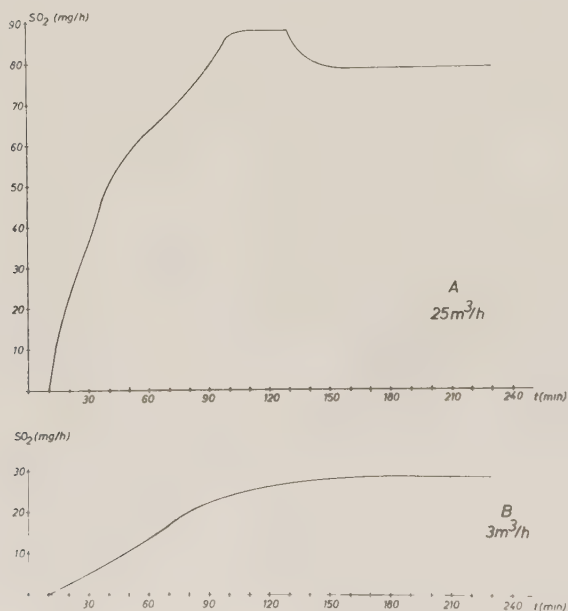


Abb. 6

Pflanzenbedingter SO_2 -Schwund in der Prüfkammer
(Bezugsgröße: 100 g Trockensubstanz 5,03 m² Pflanzenoberfläche)

Als Bezugsgröße wurde das Trockengewicht gewählt, da dies schneller bestimmt werden kann im Gegensatz zu der Oberfläche von jeweils 20 Versuchspflanzen. Aufgrund von vergleichenden Messungen entsprechen 100 g Trockensubstanz von Petunien einer Pflanzenoberfläche von ca. 5,03 m².

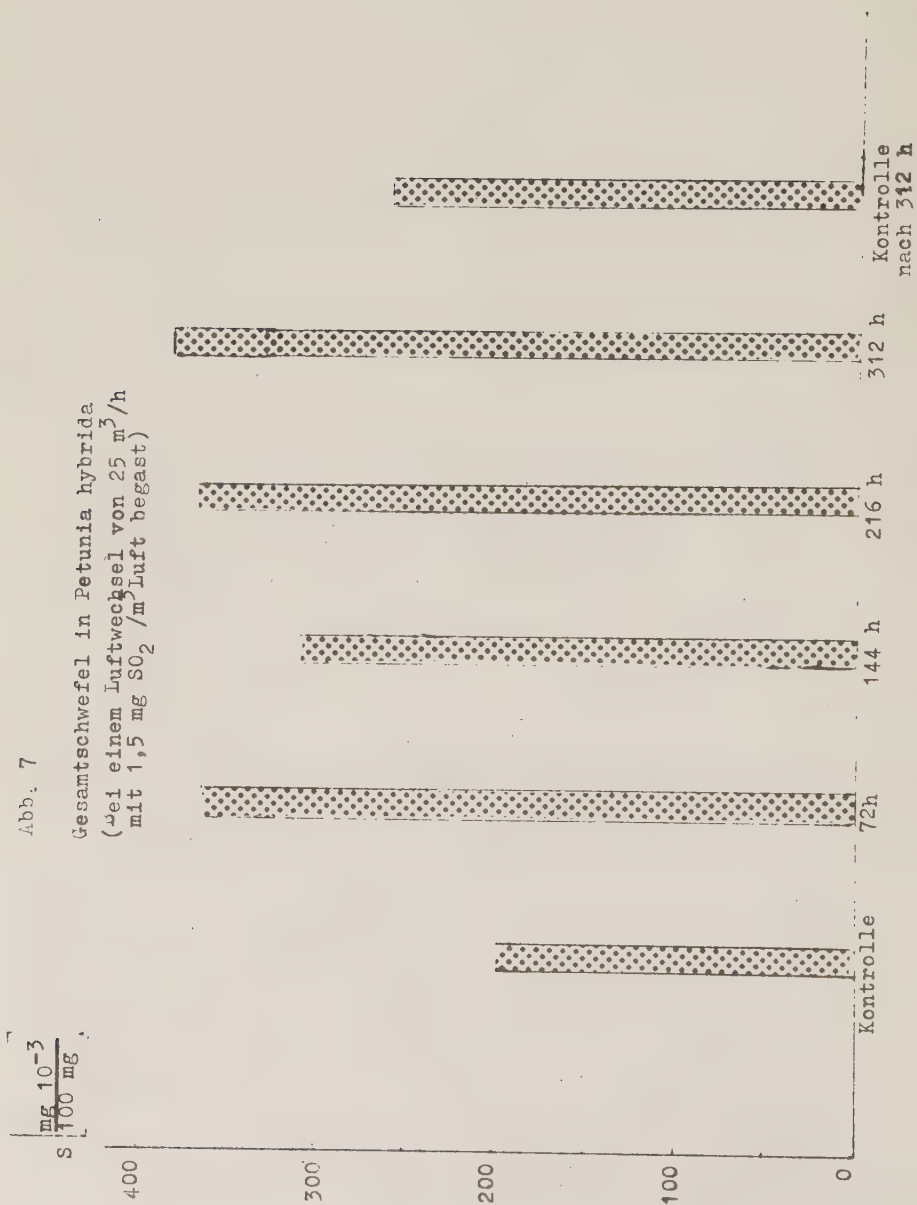
Wird unter gleichen Bedingungen, aber bei einem Luftdurchsatz von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ in den leeren Prüfraum die Konzentration von $5,4 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft gegeben (Abb. 5B), so werden in der Stunde $16,2 \text{ mg SO}_2$ durch die Kammer geleitet. Nach dem Einsetzen der Petunien (Trockengewicht: $42,5 \text{ g}$; Oberfläche: $2,15 \text{ m}^2$) wird zwar in etwa der gleichen Zeit (210 Minuten) eine konstante SO_2 -Konzentration im Prüfraum erreicht, aber die Differenz zum pflanzenleeren Prüfraum beträgt nun sogar $4,15 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft (Tab. 1). In einer Stunde werden dann aber maximal $12,45 \text{ mg SO}_2$ von den Pflanzen aufgenommen wie in Abb. 6 B aus dem Verlauf des pflanzenbedingten SO_2 -Schwundes im Prüfraum bezogen auf 100 g Trockensubstanz zu sehen ist.

Tabelle 1

Änderung der SO_2 -Konzentration im Prüfraum in Abhängigkeit vom Luftwechsel

Luftwechsel	Zeit bis zum Erreichen der Endkonzentration	Gemessene Minderung der SO_2 Konz. im Begasungsraum	Berechneter SO_2 -Schwund
m^3/h	min.	mg/m^3 %	mg/h
25	150	1,35 34,6	33,75
3	210	4,15 76,8	12,45

Werden nun die bei unterschiedlichem Luftdurchsatz gemessenen SO_2 -Konzentrationen miteinander verglichen, so zeigt sich, daß bei einer Luftmenge von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ die Schwefeldioxidkonzentration im Prüfraum durch die Pflanzen stärker reduziert wird als bei einem Luftwechsel von $25 \text{ m}^3/\text{h}$. Diese Verminderung der SO_2 -Konzentration bei einem Luftmassenwechsel von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ stellt nur scheinbar eine stärkere SO_2 -Aufnahme durch die Pflanzen dar als bei hohem Luftwechsel. Insgesamt wird bei einem hohem Luftdurchsatz quantitativ mehr Schwefeldioxid aufgenommen als bei geringem Luftwechsel (BRENNAN and LEONE 1968) wie nach Abbildung 6 aus dem pflanzenbedingten SO_2 -Schwund zu schließen ist. Das mengenmäßig differierende SO_2 -Angebot und die unterschiedliche Verweildauer der SO_2 haltigen Luft in der Kammer müssen als Grund für die unterschiedliche Minderung der SO_2 -Konzentration angesehen werden.



Diese Ad- und Absorptionerscheinungen von SO_2 sind vor allem an gesunden Pflanzen festzustellen, die zum ersten Mal einer SO_2 -Konzentration ausgesetzt sind. Mit fortschreitender Begasungszeit gleichen sich die anfänglichen Konzentrationsunterschiede bei verschieden starkem Luftwechsel in der pflanzenbestandenen Prüfkammer mehr und mehr aus. Je nach Höhe der Schadgaskonzentration und des Luftwechsels kann nach 2 - 4 Tagen eine SO_2 -Aufnahme der Pflanzen durch Minderung der SO_2 -Konzentration im pflanzenbesetzten Prüfraum nicht mehr gemessen werden. Dies zeigt auch das Ergebnis von Schwefelanalysen, die an begasten Pflanzen durchgeführt wurden (Abb. 7). Dabei wird deutlich, daß innerhalb von 3 Tagen eine so starke Anreicherung von Schwefel in den Petunienpflanzen erfolgt, daß bei fortgesetzter Begasung keine weitere Erhöhung des S-Gehaltes feststellbar wird. Das Schwanken der S-Werte in Abb. 7 rührt von der individuellen SO_2 -Aufnahmefähigkeit der analysierten Pflanzen her. Eine besondere Bedeutung ist dieser Erscheinung daher nicht zuzumessen. Dieser Befund deckt sich auch mit der Angleichung der registrierten SO_2 -Konzentration im Prüfraum an den theoretischen Wert, der aus der Förderleistung der Dosierpumpe und dem Luftwechsel errechnet wird. Vor allem für Kurzzeitversuche ist daher die Wirkung dieser SO_2 -Aufnahme von Bedeutung.

Die Verminderung der SO_2 -Konzentration ist allein auf die Aufnahme durch die Pflanzen zurückzuführen, da die Tontöpfe in Plastikhüllen steckten, die unmittelbar an der Basis der Pflanze über der Erde abgedichtet wurden. Kontrollversuche über der Adsorption solcher mit Plastikhüllen umgebenen und abgedichteten Tontöpfen mit feuchter Erde ohne Pflanzen zeigten keinerlei Veränderung der SO_2 -Konzentration in der Klimakammer. Mit der Plastikummüllung wurde zugleich die Wasserdampfabgabe über die poröse Tonwand verhindert, die das Schrankklima nachteilig beeinflussen könnte.

Die unterschiedliche Verminderung der SO_2 -Konzentration in der Klimakammer durch Einbringen von Petunien bei verschiedenen hohem Luftdurchsatz zeigt Abb. 8. Werden die Testpflanzen aus dem Prüfraum entfernt, so erreicht die SO_2 -Konzentration wieder den ursprünglichen Wert. Bei einem Luftdurch-

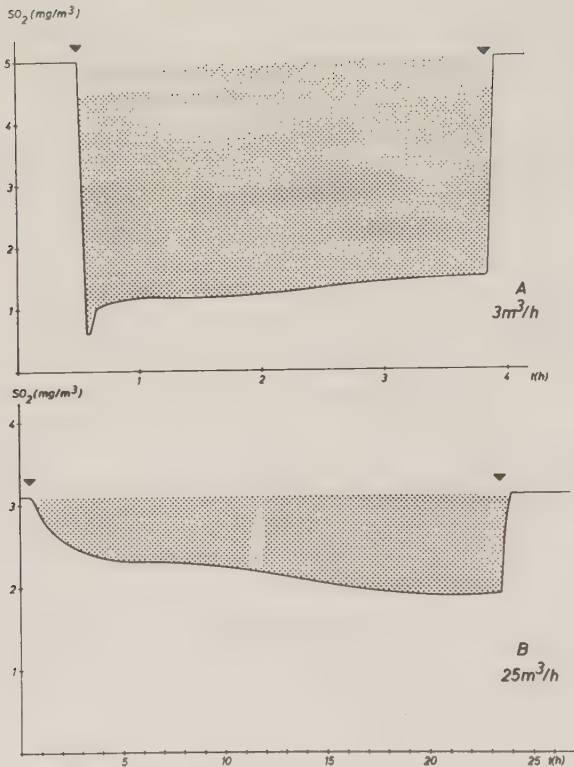


Abb. 8

Abnahme der SO_2 -Konzentration im Prüfraum durch Einbringen von unbegastem Pflanzenmaterial gleicher Größenordnung. Luftdurchsatz, A: $3 \text{ m}^3/\text{h}$; B: $25 \text{ m}^3/\text{h}$

satz von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ nimmt die SO_2 -Konzentration durch den Pflanzenbestand um 70 % ab. Von den Pflanzen werden also 10,5 mg SO_2 in der Stunde aufgenommen. Bei einem stündlichen Luftmassenwechsel von 25 m^3 verringert sich die SO_2 -Konzentration um 56,2 % also um 1,4 mg SO_2 pro m^3 Luft. In einer Stunde sind dies aber 35 mg SO_2 die von den Pflanzen aufgenommen werden könnten.

Es ist daher bei allen Begasungsversuchen notwendig außer einer Konzentrationsangabe des Schadgases auch den genauen Luftdurchsatz pro Zeiteinheit anzugeben, um so zu vergleichbaren quantitativen Beziehungen zwischen Schadgasangebot und Wirkung zu gelangen.

2.) SO_2 -Aufnahme der Petunien bei Belichtung und bei Dunkelheit

Die Abbildung 9 demonstriert in welchem Umfang die SO_2 -Aufnahme der Pflanzen vom Licht beeinflusst wird. Die Abnahme der SO_2 -Konzentration beim Einschalten des Lichtes wird besonders bei geringem Luftdurchsatz vom Meßgerät gut erfaßt, da die Verweildauer der SO_2 -haltigen Luft in der Kammer relativ lang ist. Diese verstärkte Aufnahme von SO_2 im Licht durch die Petunien dürfte wohl folgende Ursachen haben: Wie bereits berichtet, tritt mit dem Zünden der Xenonlampe auch sofort eine Temperaturerhöhung von 3°C ein. So wirkt sich also nicht allein die Belichtung sondern auch noch der Temperatursprung auf die Pflanzen aus. Mit dem Wechsel von dunkel zu hell wird demnach der Stoffwechsel der Pflanzen spontan beeinflusst, insbesondere der Wasserhaushalt durch Veränderung der Transpirationswiderstände. Dies äußert sich in einer sprunghaft ansteigenden Wasserabgabe über die Cuticula. Sie muß sich auf die Grenzschicht zwischen Blattoberfläche und der Kammerluft auswirken. Durch diese spontan erhöhte Wasserabgabe wird in der Grenzschicht das Sättigungsgleichgewicht der Dunkelphase aufgehoben. Die zweite Phase, die sehr schnell die erste überwiegt (HEILING 1933; KELLER und MÜLLER 1958) wird durch die Öffnungsbewegung der Stomata bestimmt. Sie ermöglicht das Eindringen von SO_2 ins Blattinnere. Daraus resultiert die starke Konzentrationsabnahme von SO_2 im Klimaprüfraum (Abb. 9A). Beim plötzlichen Wechsel vom Licht zum Dunkel dürfte sich das Geschehen in gleicher Phasenfolge nur in umgekehrter Richtung vollziehen.

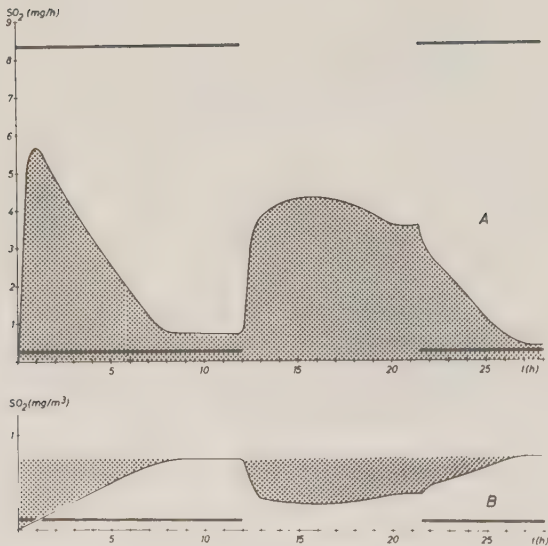


Abb. 9

A: SO_2 -Aufnahme von Petunien auf 100 g Trockensubstanz
(5,03 m² Pflanzenoberfläche) bezogen.

B: Lichtabhängige Änderung der SO_2 -Konzentration im
pflanzenbestandenen Prüfraum.
(Dauer der Dunkelphase durch dicke schwarze Linien
dargestellt).

3.) CO_2 - Gaswechsel der Versuchspflanzen unter dem Einfluß von Schwefeldioxid

Wenn WIELER schon 1933 bemerkt: "Die Frage, ob und wie die Säuren auf die Assimilation der Pflanzen wirken hat nicht nur erhebliches wissenschaftliches, sondern auch großes praktisches Interesse", so ist diese Frage auch heute noch offen, da die Lösung dieses komplexen Problems bisher nicht restlos gelungen ist. Die Photosynthese ist einer der empfindlichsten Lebensprozesse. Zu den zahlreichen Hemmstoffen (STÄLFELT, KOK; Handbuch V 1960) durch die der photosynthetische Stoffaufbau blockiert wird, gehört auch Schwefeldioxid, das bereits lange als solches Gift bekannt ist (WIELER, 1905; WISLICENUS, 1914; FISCHER, 1967).

Es sollte nun versucht werden mit den Mitteln der modernen Meß- und Regeltechnik die Beziehung zwischen Photosynthese und Atmungsintensität der Pflanzen und dem SO_2 -Angebot aufzudecken. Die Messungen des CO_2 -Gaswechsels wurden unter konstanten Klimabedingungen durchgeführt, um so zu vergleichbaren und nur von den unterschiedlichen SO_2 -Mengen und der Expositionszeit abhängigen Ergebnissen zu gelangen. Die Temperatur in der Kammer war über den Regler auf 25°C eingestellt. Sie betrug im Dunkeln 25°C und im Licht dagegen durch die Wärmestrahlung der Xenonlampe 28°C . Die Luftfeuchte wurde ebenfalls über eine Programmscheibe eingeregelt, die auf 35 % rel. Feuchte eingestellt war. Wie bereits beschrieben, wird aber durch die Transpiration der Pflanzen die relative Feuchte in der Kammer erhöht. Im Dunkeln ist daher ein Wert von 41 % rel. Feuchte und im Licht 43 % - 45 % rel. Feuchte registriert worden. Die Lichtversuche wurden sämtlich bei voller Einstrahlung der Xenonlampe (18 000 "Lux") ausgeführt, um so bei optimalen Bedingungen für die CO_2 -Assimilation zu arbeiten. Damit sollte zunächst der CO_2 -Umsatzmessung im Licht bzw. im Dunkeln Kurven, die den CO_2 -Verbrauch bzw. die CO_2 -Abgabe aufzeigten und als Kontrollkurven dienten. Nur so konnten die in späteren Versuchsreihen bei gleichartigen hell-dunkel Bedingungen aber SO_2 -Begasung registrierten Änderungen im CO_2 -Gehalt der Kammerluft kausal

auf pflanzliche Reaktionen zurückgeführt werden.

A.) CO_2 -Umsatz unter 10 - 12 stündigem SO_2 -Einfluß.

In einer Versuchsserie wurde die Wirkung von länger andauernder SO_2 -Begasung bei Belichtung geprüft. Die Abbildung 10 demonstriert wie der Gasumsatz unter Wirkung von $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ verändert wird. Zwei Stunden nach Einbringen der Pflanzen in den Prüfraum, der $780 \text{ mg CO}_2/\text{m}^3$ enthielt, wurde mit der SO_2 -Begasung begonnen.

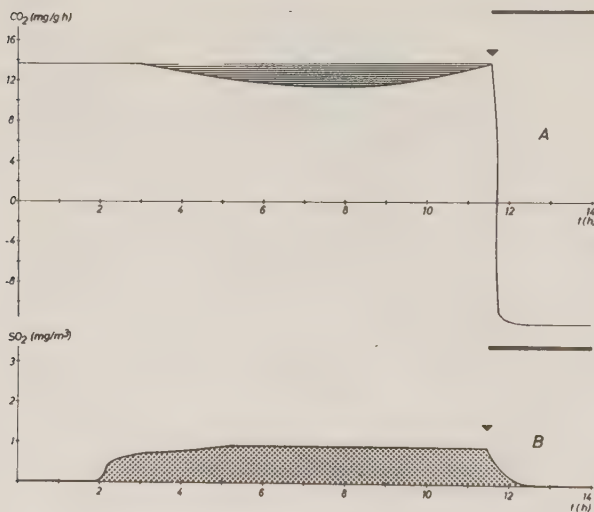


Abb. 10

CO_2 -Umsatz (A) von Petunia im Licht unter dem Einfluß einer 9,5 stündigen Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ (B).

(Dunkelphase durch dicke schwarze Linien dargestellt)

Obwohl 1 Stunde später schon die SO_2 -Endkonzentration erreicht war, ließ sich zu dieser Zeit noch keine Depression der Photosyntheseaktivität erkennen. In der folgenden Stunde wurde eine solche immer deutlicher, erreichte 5 Stunden nach Einsetzen der

der Begasung ein Maximum, um dann in einer Art "Regeneration" wieder dem Ausgangswert zuzustreben. Mit Abschalten des Lichtes und der Begasung wird die CO_2 -Aufnahme reduziert und die Abgabe von CO_2 überwiegt.

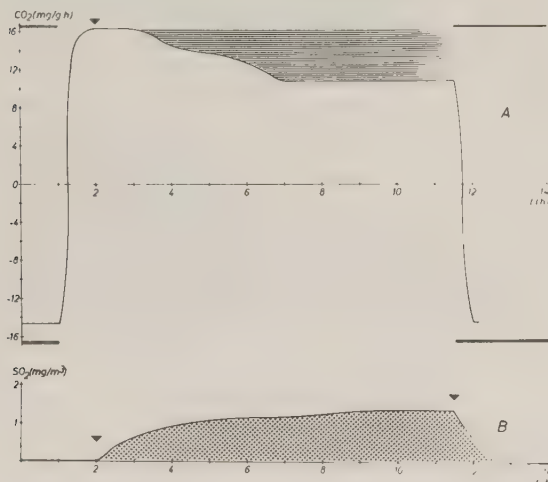


Abb. 11

CO_2 -Umsatz (A) von Petunia im Licht bei 9,5 stündiger Begasung mit $1,3 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft (B).

(Dunkelphase durch dicke schwarze Linien dargestellt)

In Abbildung 11 wird gezeigt wie eine SO_2 -begasung mit einer höheren Schadgasmenge von $1,3 \text{ mg/m}^3$ sich auf die CO_2 -aufnahme durch die Pflanzen auswirkt. Wie im vorangegangenen Experiment (Abb. 10) ist in der ersten Begasungsstunde keine Beeinflussung des CO_2 -umsatzes festzustellen. Erst anschließend setzt eine Abnahme der Photosynthese ein, deren höchste Minderung gleichermaßen nach 5 Stunden erreicht ist. Jedoch tritt während der weiteren Begasung kein Rückgang ein, sondern der CO_2 -umsatz bleibt konstant auf dem um $5,6 \text{ mg/g h}$ reduzierten Wert. Dies entspricht einer Reduktion der Nettoassimilation um 29,2 Prozent.

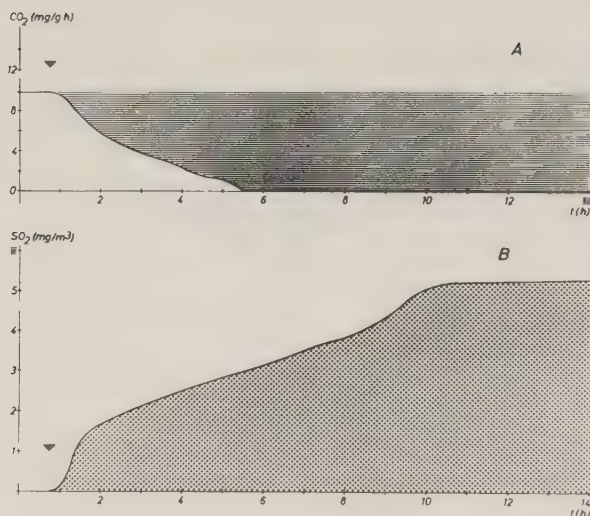


Abb. 12

CO₂-Umsatz (A) von Petunia bei Belichtung unter dem Einfluß von (B) 5 mg SO₂/m³ Luft.

Bei einer weiteren Steigerung der SO₂-Begasungsmenge auf 5 mg/m³ ist aus Abbildung 12 zu ersehen, daß nun unmittelbar nach Einsetzen der Begasung auch der Rückgang der Photosynthese beginnt. Die zugesetzte hohe SO₂-menge bewirkt bereits nach 4,5 Stunden die maximale CO₂-Drosselung obwohl zu diesem Zeitpunkt erst ca. 60 % der Endkonzentration gemessen worden sind. Durch diese Menge SO₂ wird gerade das Kompensationsgleichgewicht zwischen dem respiratorischen und dem photosynthetischen Stoffwechsel eingestellt. Wie in Abb. 12 zu sehen ist erreicht nämlich die CO₂-Kurve nach 4,5 h die Null-Linie. Interessant ist hierbei die Beobachtung, daß 15 - 20 Minuten nach Erreichen der Kompensationslage vereinzelt auf den Blattspreiten infiltrierte Gewebezonen erkennbar waren, die sich im weiteren Verlauf zu Nekrosen entwickelten.

B.) CO_2 -Umsatz bei unterschiedlich langer SO_2 -Belastung

Bei den bisher geschilderten Versuchen fanden SO_2 -Begasung und CO_2 -Umsatzbestimmung jeweils über einen zwölfstündigen Zeitraum statt. Nachfolgend sei über Experimente berichtet, bei denen die Begasung kurzfristig war, die CO_2 -Messung im Prüfraum jedoch mehrere Stunden länger durchgeführt wurde.

Im folgenden Experiment (Abb. 13) wurde 1 Stunde nach Einbringen der Pflanzen in die Kammer die Lampe gezündet und nach 2,5 Stunden mit der SO_2 -Begasung ($1,3 \text{ mg/m}^3$) begonnen. 3,5 Stunden nach Begasungsbeginn war die Endkonzentration erreicht und die SO_2 -Zufuhr wurde abgeschaltet.

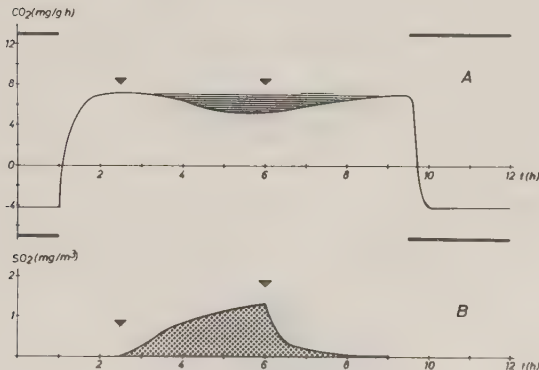


Abb. 13

CO_2 -Umsatz (A) von Petunia im Dunkeln (dicke schwarze Linien) und im Licht. Die Begasung im Licht mit $1,3 \text{ mg SO}_2 \text{ pro m}^3$ (B) dauerte 3,5 Stunden.

Bereits 60 Minuten nach Eintritt des Gases in die Kammer machte sich eine Reduktion der Photosynthese bemerkbar, die nach 3,5 Stunden ihr Maximum erreichte. Nach Beendigung der SO_2 -Begasung stieg auch wieder die CO_2 -Aufnahme bis zum Ausgangswert an.

Wird in Abbildung 11 die Wirkung von einer 9,5 stündigen Begasung mit $1,3 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ gezeigt, die die CO_2 -Aufnahme nach

5 Stunden auf einen konstanten Wert von 78,8 % der ursprünglichen CO_2 -Aufnahme reduziert, so wird aus Abb. 13 deutlich, daß bei kurzfristiger Einwirkung der gleichen SO_2 -Konzentration der pflanzliche Organismus wieder zur "Regeneration" fähig ist.

Hier bietet sich von der Wirkungsseite her ein Vergleich der in Abb. 10 und Abb. 13 dargestellten Versuche an. In beiden Fällen erreicht die verminderte CO_2 -Aufnahme, bedingt durch die Schwefeldioxidbegasung wieder den Ausgangswert. So bewirkt eine SO_2 -Dosis von $1,3 \text{ mg/m}^3$ über 3,5 Stunden das gleiche Phänomen wie eine solche von $0,9 \text{ mg/m}^3$ über 11,5 Stunden.

Bei 6 stündiger Begasung mit der höheren SO_2 -Konzentration von 5 mg/m^3 (Abb. 14) wurde bei gleicher Dosierleistung der Pumpe wie im Versuch zu Abb. 12 die theoretische Endkonzentration im Prüfraum nicht erreicht.

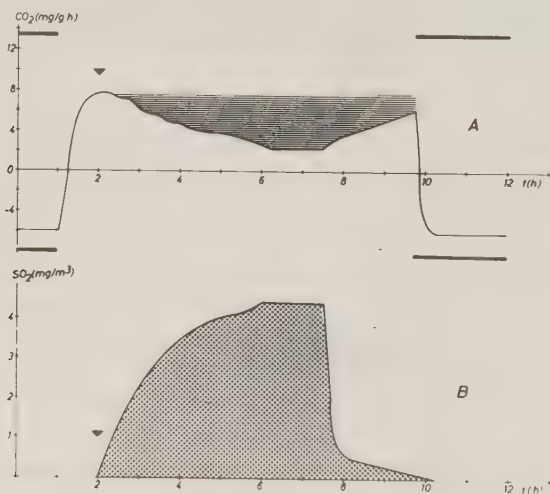


Abb. 14

A: CO_2 -Gaswechsel von Versuchspflanzen mit und ohne (dicke schwarze Linien) Licht.

B: Die Begasung im Licht mit $5 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ dauerte 6 h

Durch den pflanzenbedingten SO_2 -Schwund wurden lediglich max. $4,5 \text{ mg/m}^3$ erreicht. Diese SO_2 -Menge ließ die CO_2 -Aufnahme der Pflanzen um $5,4 \text{ mg/g h}$ d.h. auf 31 % des anfänglichen CO_2 -Umsatzes absinken. Jedoch setzt sehr schnell nach Beendigung der SO_2 -Begasung ein erneuter Anstieg der Nettoassimilation ein.

C.) Begasung in Dunkelversuchen

Die Wirkung von SO_2 auf Photosynthese samt Respiration wurde in den bisher dargelegten Untersuchungen nur durch Begasung im Licht geprüft. Nun soll an zwei Beispielen gezeigt werden wie eine im Dunkeln durchgeführte SO_2 -Begasung im Bereich der natürlichen Immissionskonzentrationen auf den CO_2 -Gaswechsel der Pflanzen wirken kann.

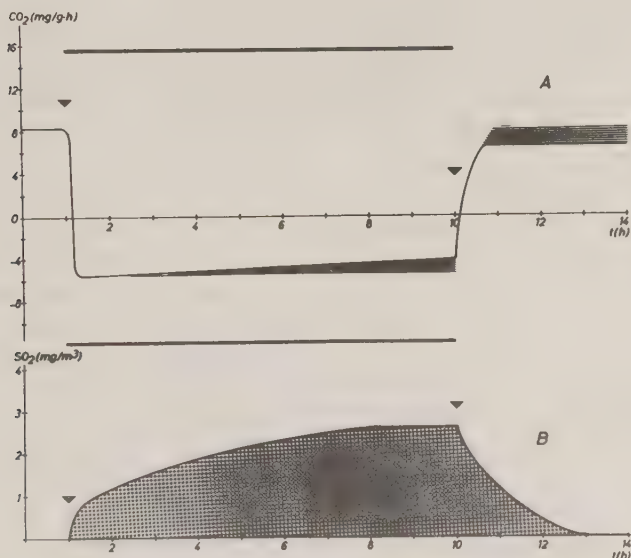


Abb. 15

CO_2 -Gaswechsel (A) der Petunienpflanzen bei SO_2 -Begasung (B) im Dunkeln (dicke schwarze Linie) mit $2,6 \text{ mg pro m}^3$ Luft.

In Abbildung 15 ist zunächst die konstante CO_2 -Aufnahme der Petunien von $8,4 \text{ mg CO}_2/\text{g h}$ bei Belichtung zu sehen. Nach dem Abschalten des Lichtes wurde die Begasung mit SO_2 vorgenommen. Während der Dunkelphase wurde maximal $2,6 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft registriert. Die Expositionszeit der Petunien im Dunkeln betrug 9 Stunden. Anschließend wurde beim Einschalten des Lichtes auch die SO_2 -Zufuhr abgestellt. Während dieser Zeit nahm die Respiration der Pflanzen maximal um $1,6 \text{ mg CO}_2/\text{g h}$ ab. Dies entspricht einer Verminderung der CO_2 -Abgabe um $28,5 \%$. Nach dem Einschalten des Lichtes wird sehr bald wieder ein konstanter Wert für die Nettoassimilation registriert. Dieser liegt jedoch $1,8 \text{ mg/g h}$ unter der ursprünglichen CO_2 -Aufnahme vor der Begasung. Somit ist als Folge der Dunkelbegasung mit SO_2 auch die apparente Photosynthese um $22,2\%$ reduziert worden.

Aus der Abbildung 16 wird der gleiche Zusammenhang von SO_2 -Begasung im Dunkeln und dem Einfluß auf den respiratorischen und photosynthetischen Stoffwechsel sichtbar. In diesem Versuch wurde eine fast doppelt so hohe maximale SO_2 -Konzentration ($4,5 \text{ mg/m}^3$) wie im zuvor geschilderten Experiment registriert. Vor der Schwefeldioxidbegasung wurde im Dunkeln und Hellen der CO_2 -Gaswechsel der Testpflanzen (Abb. 16) registriert. Mit dem Beginn der Begasung wird auch sofort entsprechend der hohen SO_2 -Dosis, der die Pflanzen im Prüfraum ausgesetzt sind, die CO_2 -Abgabe stark vermindert. Während der SO_2 -Begasung nimmt die CO_2 -Abgabe der Pflanzen insgesamt um $5,6 \text{ mg/g h}$ ab, so daß die Respiration auf 43% des Ausgangswertes absinkt. Nach Beendigung der SO_2 -Begasung wird die Xenonlampe gezündet, um die Nettoassimilation zu erfassen. Wie aus Abb. 16 zu sehen ist, wird im Licht die Kompensationslage der Testpflanzen nicht mehr erreicht. Der CO_2 -Umsatz ist durch die SO_2 -Begasung mit $4,5 \text{ mg/m}^3$ um $11,2 \text{ mg CO}_2/\text{g h}$ zurückgegangen. Diese Reduktion des Gesamtumsatzes an CO_2 im Licht von $19,6 \text{ mg/g h}$ auf $2,8 \text{ mg/g h}$ hat auch sichtbare Schäden an den Petunienblättern zur Folge. Mit dem Absinken der CO_2 -Aufnahme im Licht auf (Abb. 12) die Kompensationslage bzw. darunter (Abb. 16) entstehen an den Blättern der Petunien die bereits erwähnten Nekrosen.

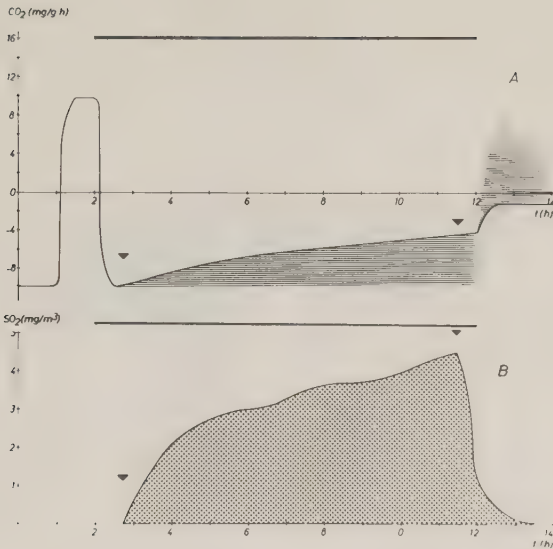


Abb. 16

CO₂-Gaswechsel (A) von Petunienpflanzen, die im Dunkeln (dicke schwarze Linien) mit SO₂ (B) begast wurden. Vor der Einwirkung von SO₂ wurde Respiration und Assimilation der Testpflanzen (A) gemessen.

D.) Kurzfristige Stoßbegasungen

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen wie sich Stoßbegasungen mit kurzen aber relativ hohen SO₂-Spitzenkonzentrationen auf den Verlauf des CO₂-Gaswechsels im Licht auswirken. Bei kurzen stündlich sich wiederholenden SO₂-Stößen (Abb. 17) erfolgt eine sehr schnelle Beeinflussung des CO₂-Gaswechsels von Petunia. Sind anfänglich noch Erholungserscheinungen zu erkennen, so besteht doch die Gesamtwirkung der 5 Begasungsstöße in einer deutlichen Abnahme des CO₂-Umsatzes innerhalb der ersten 9 Stunden. Der CO₂-Gaswechsel der Petunien, der im Licht unter konstanten Klimabedingungen sich auf eine Gleichgewichtslage eingestellt hatte, wurde durch die auf einander folgenden SO₂-Stoß-

konzentrationen in Schwingungen versetzt bis nach Beendigung der SO_2 -Einwirkung sich ein neues Gleichgewicht des CO_2 -Umsatzes herausbildete, das zwar über dem letzten Tiefpunkt lag, aber nur noch 28,4 % des Ausgangswertes vor der SO_2 -Begasung betrug.

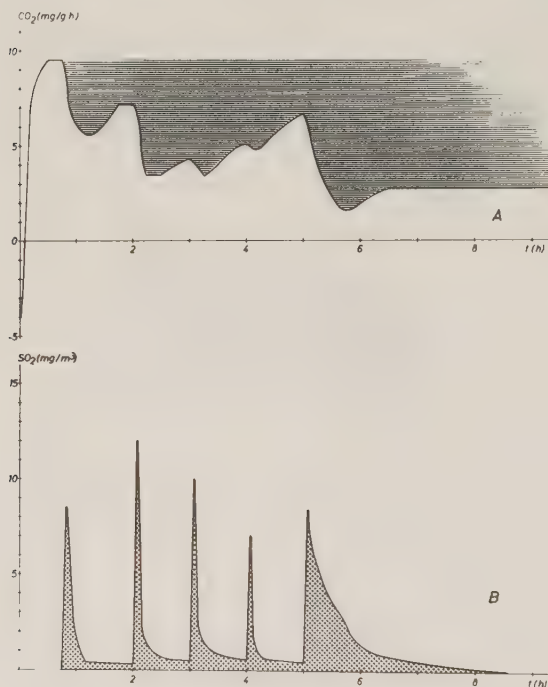


Abb. 17

Einwirkung stündlicher SO_2 -Stoßbegasung (B) auf den CO_2 -Gaswechsel (A) der Versuchspflanzen.

Wirkten im Versuch zu Abb. 17 stündlich SO_2 -Konzentrationen auf die Testpflanzen, so wurden im Experiment zu Abb. 18 die SO_2 -Stoßbegasungen erst ausgeführt, nachdem für mindestens 15 Minuten ein konstanter CO_2 -Umsatz registriert wurde. Die Photosynthese der Pflanzen spricht sehr schnell und stark

auf das Schwefeldioxid vor allem beim ersten Begasungsstoß an, doch folgt gleich anschließend eine Erholung, bei der allerdings der ursprüngliche Wert der CO_2 / O_2 Gleichgewichtslage doch nicht mehr erreicht wird. Obwohl die weiteren Stoßkonzentrationen höher sind ist die Wirkung nicht mehr so ausgeprägt wie bei der ersten SO_2 -Einwirkung.

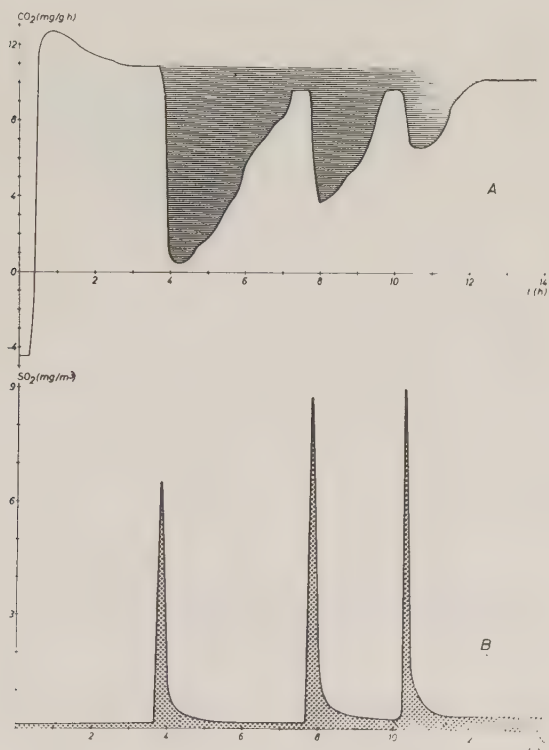


Abb. 18

Begasung mit steigenden SO_2 -Stoßkonzentrationen (B). Nachdem jeweils für 15 Minuten ein konstanter CO_2 -Umsatz der Testpflanzen (A) registriert wurde, erfolgte ein weiterer Begasungsstoß mit Schwefeldioxid.

Sinkt anfangs der CO_2 -Umsatz von $10,9 \text{ mg/g h}$ auf $0,5 \text{ mg/g h}$ so bewirkt der zweite SO_2 -Stoß eine Reduktion bis auf $3,7 \text{ mg/g h}$. Durch den dritten Begasungsstoß geht der CO_2 -Umsatz nur gering von $9,7 \text{ mg/g h}$ bis auf $6,6 \text{ mg/g h}$ zurück. Dies weist auf die Bedeutung von Pausen zwischen den SO_2 -Stößen hin (ZAHN 1963, 1969) in denen offensichtlich eine Erholung des Assimilationsvermögens erfolgt.

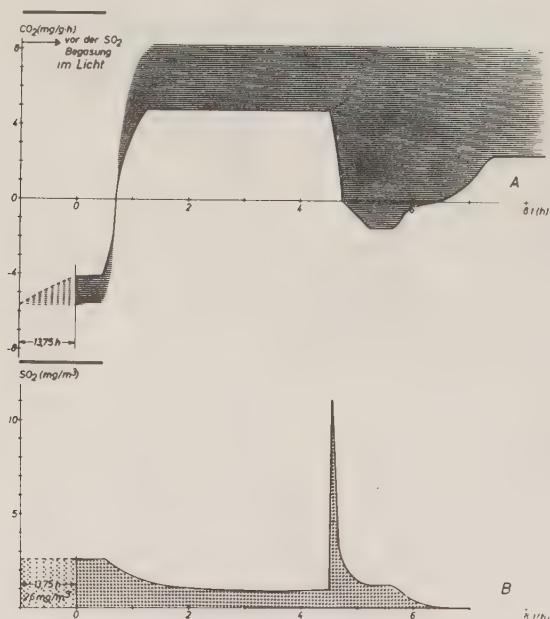


Abb. 19

CO_2 -Umsatz der Testpflanzen (A) während der Begasung mit Schwefeldioxid (B). Der gestrichelte Teil der Kurve (A) gibt die CO_2 -Abgabe während der Dunkelphase (13,75 h; dicke schwarze Linie) unter Einfluß von $2,6 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ (B) wieder. Vor der SO_2 -Begasung wurde die CO_2 -Aufnahme der Testpflanzen im Licht mit $8,3 \text{ mg CO}_2/\text{g h}$ gemessen.

Die Wirkung einer längeren SO_2 -Begasung im Dunkeln ist aus Abbildung 19 ersichtlich. Zunächst wurde vor Beginn der Begasung die CO_2 -Aufnahme der Testpflanzen im Licht mit $8,3 \text{ mg/g h}$ registriert. Mit Beginn der Dunkelphase, die insgesamt 14,5 Stunden dauerte, setzte auch die SO_2 -Begasung ein. Unter dem Einfluß von $2,6 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ verminderte sich die CO_2 -Abgabe der Testpflanzen auf 4 mg/g h während der SO_2 -Einwirkung. Nach Einschalten des Lichtes wird der CO_2 -Umsatz sofort geändert und nach 50 Minuten erreicht er gemäß den Versuchsbedingungen eine neue Gleichgewichtslage, die um $42,2 \%$ gegenüber dem anfangs registrierten "Licht-Wert" reduziert ist. Diese Verminderung der Photosynthese ergab keine sichtbaren Schäden an den Pflanzen. Die SO_2 -Konzentration fiel nach Einschalten des Lichtes von $2,6 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft auf $1 \text{ mg SO}_2 \text{ pro m}^3$ ab. Dieses Absinken der SO_2 -Konzentration weist offensichtlich auf eine verstärkte SO_2 -Aufnahme durch die Pflanzen im Licht.

Eine kurzfristige SO_2 -Stoßkonzentration von maximal 11 mg/m^3 störte das neu eingestellte Gleichgewicht des CO_2 -Gaswechsels beachtlich, indem es zu einem Unterschreiten des Kompensationspunktes kam. Die Ausbildung von Nekrosen waren die Folge. Nach dieser Stoßbegasung wurde die SO_2 -Zufuhr in den Luftstrom der Klimakammer gänzlich gedrosselt. Dies spiegelt sich auch im CO_2 Umsatz wieder. Die neue Gleichgewichtslage des CO_2 -Umsatzes liegt nun noch niedriger. Durch diesen SO_2 -Stoß ist offensichtlich die Pufferkapazität (THOMAS et al. 1950) der Versuchspflanzen überschritten worden, so daß es zu Nekrosen und einer Hemmung des assimilatorischen Stoffwechsels kam.

4.) Freilanduntersuchungen.

Ergänzend zu den Klimakammerversuchen wurden Freilanduntersuchungen im Stadtgebiet von Frankfurt ausgeführt. Dabei konnte unmittelbar an das Meßprogramm des Meteorologischen Institutes der Universität Frankfurt angeknüpft werden. Am Balkon (6 m Höhe) des Institutes wird die SO_2 -Konzentration mit einem Picoflux-Gerät von HARTMANN & BRAUN (Frankfurt) gemessen. Zur Interpretation der Untersuchungsergebnisse wurden die SO_2 -Meßdaten, die als Halbstundenwerte vorlagen, von April bis Ende Juli 1968 herangezogen. Es wurden die mittleren und maximalen SO_2 -Konzentrationen für die einzelnen Monate berechnet und in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2

Mittlere und maximale SO_2 -Konzentrationen in der Zeit vom 1.4. bis 31. 7. 1968 am Standort "Meteorologisches Institut -Balkon" (nach Daten des Meteorologischen Institutes)

	April	Mai	Juni	Juli
Mittlere				
SO_2 -Konzentration in ppm	0,03	0,02	0,02	0,02
Maximale				
SO_2 -Konzentration in ppm	0,20	0,06	0,11	0,11

Die Toleranzgrenzen für verschiedene Pflanzenarten bei langfristiger Einwirkung von SO_2 schwanken nach ZAHN (1961) zwischen 0,15 und 0,4 ppm. Dagegen geben GUDERIAN und STRATMANN (1968) und WENTZEL (1968) einen SO_2 -Grenzwert für empfindliche Pflanzen (Klee-Arten, Spinat, Fichte u. a.) mit einem Langzeitmittelwert von 0,02 ppm SO_2 an.

Im April 1968 wurden Petunia hybrida-Pflanzen in Kästen auf dem balkon in 6 m Höhe direkt unter der Ansaugstelle für die Luftanalyse (Abb. 20) und am Boden in 0 m beim Meteorologischen Institut (Abb. 21) ausgepflanz. Als Kontrolle diente der Standort "Waldfried" in einer Grünlandschaft außerhalb



Abb. 20

Versuchsstandort Meteorologisches Institut-Balkon



Abb. 21

Versuchsstandort Meteorologisches Institut-Boden

Tabelle 3
Chlorophyll a in mg/g Trockensubstanz
(Es ist jeweils der Mittelwert aus drei Bestimmungen angegeben)

	29.5.	12.6.	27.6.	11.7.	26.7.	8.8.	22.8.	5.9.
Waldfried	4,55	5,00	6,82	11,93	11,50	9,60	7,68	6,45
Meteorolog. Institut Boden	4,55	7,15	11,75	11,10	10,05	8,45	9,85	8,10
Meteorolog. Institut Balkon	5,40	7,70	9,60	11,90	8,10	9,50	9,10	8,95

Tabelle 4
Chlorophyll b in mg/g Trockensubstanz
(Es ist jeweils der Mittelwert aus drei Bestimmungen angegeben)

29.5.	12.6.	27.6.	11.7.	26.7.	8.8.	22.8.	5.9.
1,37	1,27	1,73	3,23	2,99	2,53	2,03	1,73
Waldfried							
Meteorolog. Institut Boden	1,38	1,84	2,99	3,11	2,76	2,30	2,65
							2,15
Meteorolog. Institut Balkon	1,76	2,13	2,65	3,11	2,19	2,53	2,60
							2,73

Tabelle 5

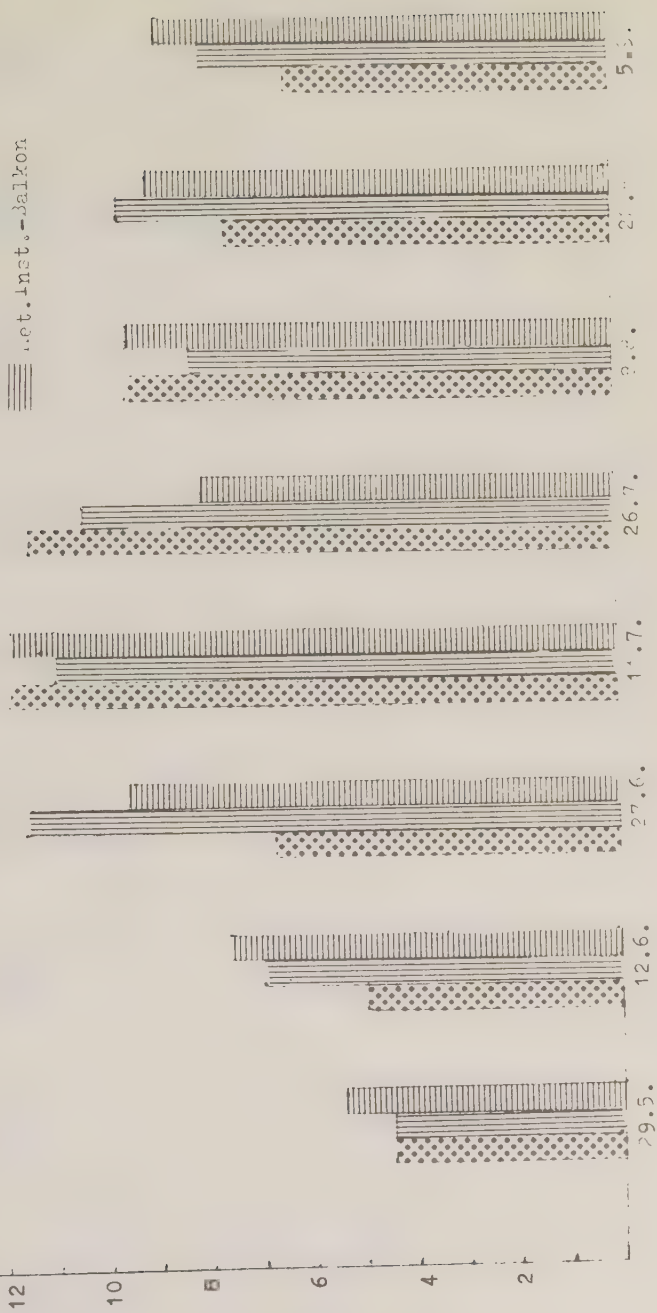
β -Carotin in mg/g Trockensubstanz
(Es ist jeweils der Mittelwert aus drei Bestimmungen angegeben)

	29.5.	12.6.	27.6.	11.7.	26.7.	8.8.	22.8.	5.9.
Waldfried	0,323	0,359	0,430	0,813	0,710	0,610	0,598	0,455
Meteorolog. Institut Boden	0,355	0,466	0,813	0,838	0,634	0,530	0,740	0,503
Meteorolog. Institut Balkon	0,443	0,455	0,681	0,765	0,598	0,538		0,562

Abb. 22
Chlorophyll a

mg / g

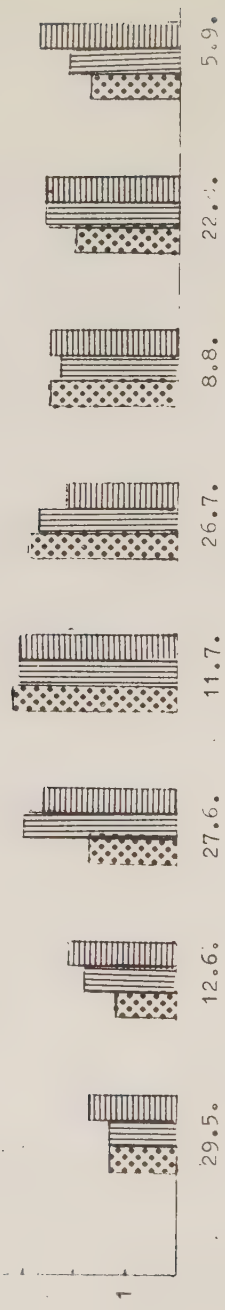
 Waldfried
 Net. Inst. - Boden
 Net. Inst. - Balkon

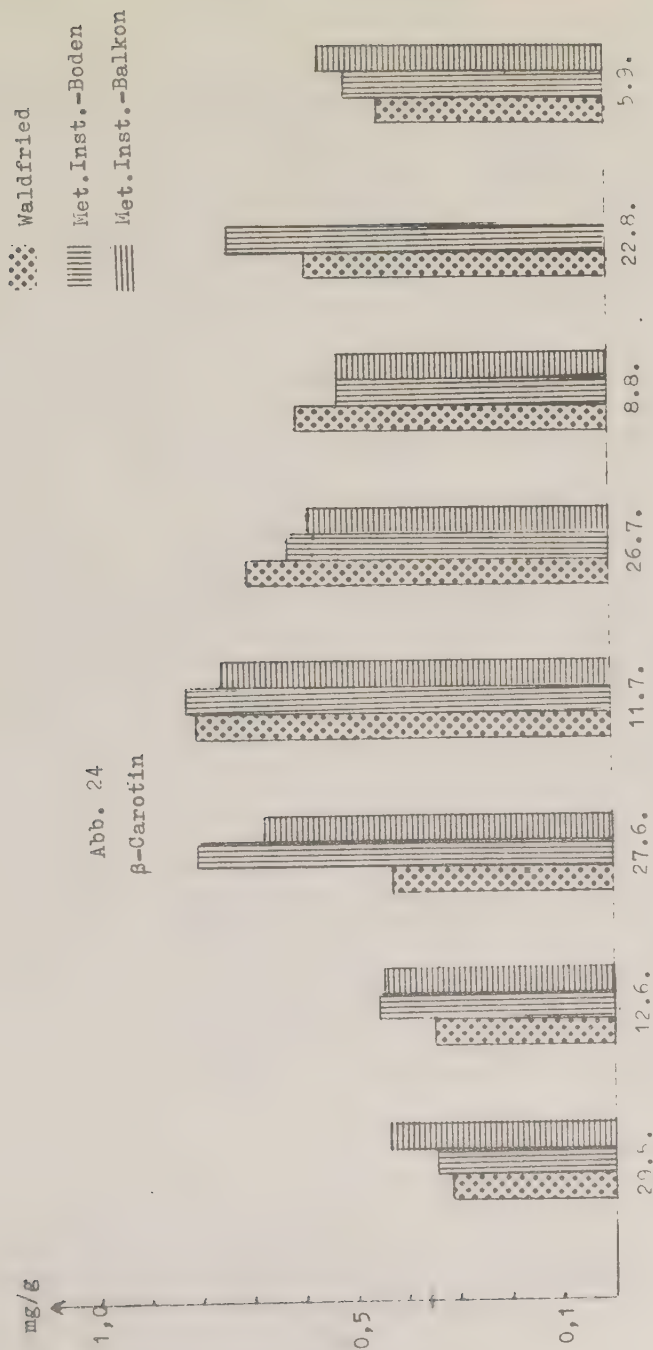


mg/g

 Waldfried
 Met.Inst.-Boden
 Met.Inst.-Balkon

Abb. 23
Chlorophyll b





des Stadtgebietes von Frankfurt. Hier befindet sich ein Anzuchtgelände des Gartenbauamtes Frankfurt auf dem die "Nullproben" ausgepflanzt wurden.

Bei den Balkon-Petunien in der Großstadt zeigen sich häufig Schäden, die vielfach sich in einem Vertrocknen der Blätter äußern indem eine Verfärbung vorangeht, d.h. Abbau des Chlorophylls. Nach MÜLLER (1957) und KLEE (1969) wird Chlorophyll a schneller als Chlorophyll b abgebaut, so daß das Verhältnis von Chlorophyll a/b verschoben wird. In Zeitabständen von 2 Wochen wurden an den drei Standorten die Blattproben von den Testpflanzen zur Pigmentanalyse entnommen. Die dünnschichtchromatographischen Analysenwerte der untersuchten Pigmentkomponenten sind in Tabelle 3 - 5 und in den Abbildungen 22 - 24 zusammengestellt. Auffallend ist am Standort "Waldfried" der stufenweise Anstieg von Chlorophyll und β -Carotin bis zum 11.7. und im weiteren Untersuchungszeitraum die ebenfalls stufenweise Abnahme des Pigmentgehaltes. Die Analysenwerte von den beiden Standorten am Meteorologischen Institut weisen im ersten Teil des Untersuchungszeitraumes ebenfalls einen stufenweisen Anstieg der einzelnen Pigmentkomponenten in den Petunien auf. Dagegen zeigen letztere Analysenwerte im zweiten Teil des Untersuchungszeitraumes wechselnde Zu- und Abnahmen der Blattfarbstoffe. In Tabelle 6 ist von den drei Standorten zu den einzelnen Analysenterminen das Mengenverhältnis von Chlorophyll a/b zusammengestellt. Dieser Quotient aus den beiden Chlorophyllkomponenten am Standort "Meteorologisches Institut-Balkon" ist stets kleiner als der entsprechende Quotient am Standort "Waldfried". Das deutet auf einen verstärkten Abbau von Chlorophyll a in den Blättern der Testpflanzen am Meteorologischen Institut hin, so daß es zu einer Verschiebung der Pigmentkomponenten kommt. Werden die Quotienten der einzelnen Standorte untereinander verglichen, so ergibt sich am "Waldfried" eine Differenz von 0,62 zwischen dem größten und kleinsten Q-Wert und am "Meteorologischen Institut-Boden" 0,62; dagegen hebt sich die entsprechende Differenz der Q-Werte am "Meteorologischen Institut-Balkon" mit 0,77 deutlich ab. In dieser Differenz spiegelt sich die Schwankung des Chlorophyll a Gehaltes wieder, der durch Immissionseinwirkungen stärker beeinflusst wird als Chlorophyll b.

Tabelle 6

Verhältnis von Chlorophyll a/b (Q-Wert)

	Waldfried	Met.Inst. Boden	Met.Inst. Balkon
29.5.	3,34 (min.)	3,30 (min.)	3,07 (min.)
12.6.	3,94	3,89	3,61
27.6.	3,96 (max.)	3,93 (max.)	3,22
11.7.	3,69	3,56	3,84 (max.)
26.7.	3,85	3,80	3,70
8.8.	3,79	3,67	3,75
22.8.	3,78	3,71	3,50
5.9.	3,73	3,77	3,28
Q _{max.} -Q _{min.}	0,62	0,63	0,77

Zum Ende des Untersuchungszeitraumes wurden Blattproben von den Petunien der drei Standorte für die quantitative Schwefelanalyse am 20.9.1968 genommen. Die erhaltenen Analysenwerte geben Tabelle 7 und Abbildung 25 wieder. Die Meßreihe dieser Tabelle wurde nach der von PÄTAU (1943) vorgeschlagenen Methode statistisch abgesichert.

Der in den Pigmentanalysen ausgeprägte Abbau von Chlorophyll a in den Petunienblättern vor allem am Standort "meteorologisches Institut-Balkon" ist offenbar weitgehend durch SO₂ bedingt, da nach JÄGER auch ein deutlicher Unterschied im Schwefelspiegel der Blätter festzustellen ist, wie sich auch im kontrollierten SO₂-Begasungsversuch (Abb. 7) diese ähnliche Erscheinung eines erhöhten S-Gehaltes in den Testpflanzen gezeigt hat.

Die Gegenüberstellung der Gesamtschwefelwerte aus Tabelle 7 und des Differenzwertes von Q_{max.} - Q_{min.} aus Tabelle 6 in Tabelle 8 verdeutlicht noch die Beeinflussung des Chlorophyllgehaltes durch den S-Gehalt, der wiederum von der SO₂-Immission beeinflusst wird.

Abb.25 Bestimmung des S-Gehaltes der Blätter von *Petunia hybrida* an den Standorten :Waldfried, Met.Inst. Boden und Met.Inst.-Balkon (nach Jäger 1969)

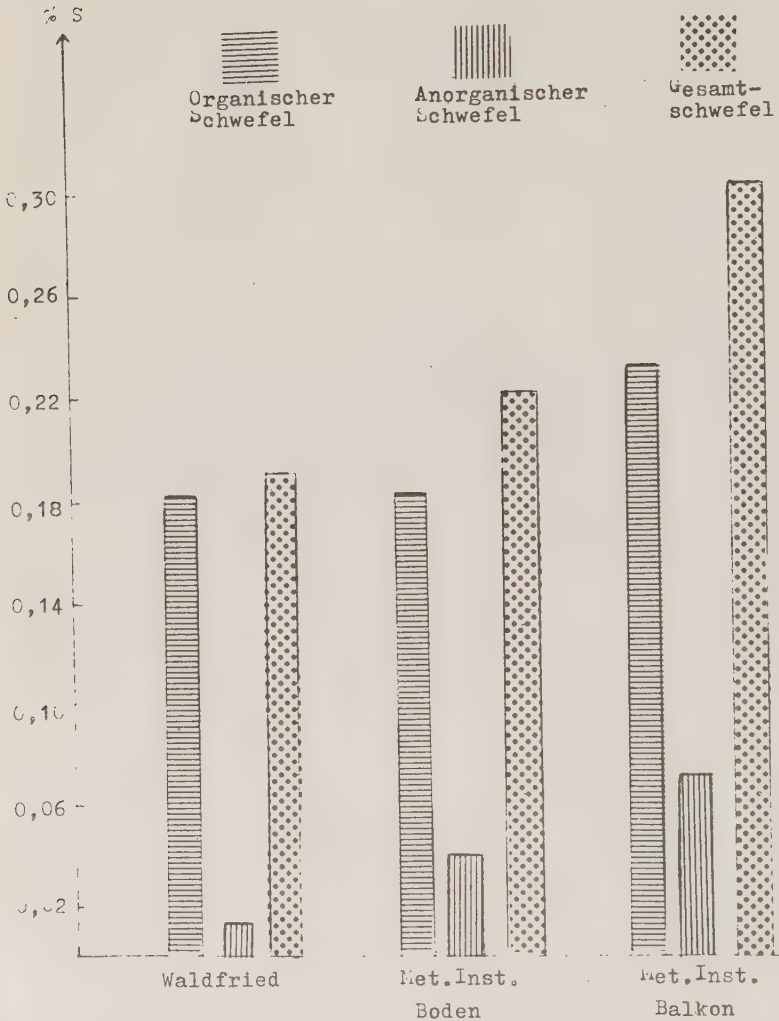


Tabelle 7

Schwefelbestimmung von Blättern von *Petunia hybrida* in 0 m und in 6 m Höhe am Meteorologischen Institut und am Waldfried. Es ist jeweils der Mittelwert aus 5 Bestimmungen angegeben. (aus JÄGER 1969)

	organ.S %	anorg.S %	Gesamt-S %
Waldfried	0,18	0,01	0,19
Met.Inst. Boden	0,18	0,04	0,22
Met.Inst. Balkon	0,23	0,07	0,30

Tabelle 8

Zusammenfassung von Tabelle 6 und 7

	Gesamt-S aus Tab. 7	Qmax.-Qmin. aus Tab. 6
Waldfried	0,19	0,62
Met.Inst. Boden	0,22	0,63
Met.Inst. Balkon	0,30	0,77

IV. Diskussion

Experimentelle Untersuchungen speziell über den Wirkungsablauf von SO_2 in den Pflanzen wurden bisher wie GUDERIAN (1966) feststellte nicht in dem Maße vorgenommen wie das Problem der Immissionen es erfordert: "Ein großer Teil der Rauchschaadensliteratur geht nämlich auf Gutachtertätigkeit zurück. Hier ersetzt aber häufig das subjektive Urteil methodische Untersuchungen mit gesicherten Ergebnissen." So kann nur an wenige einschlägige Literaturangaben zum Problem der Hemmung der CO_2 -Assimilation durch SO_2 angeknüpft werden.

Der unterschiedliche pflanzenbedingte SO_2 -Konzentrationschwund (Tab.1) in der Begasungskammer bei hohem ($25\text{m}^3/\text{h}$) und bei niederem ($3\text{m}^3/\text{h}$) Luftwechsel zeigt welche Bedeutung dem Luftmassenwechsel pro Zeiteinheit zukommt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von E. BRENNAN und I. A. LEONE (1968), die in Begasungsexperimenten mit zwei verschiedenen großen Luftwechselraten SO_2 -Begasungsversuche an Tomaten, Tabak und Petunien ausgeführt haben und dabei feststellten: "Uptake of the measurable pollutant (SO_2) was greater at the higher flow rate. The amount of sulfur absorbed during a 0,4 ppm fumigation at the high flow rate was almost equal to that absorbed during a fumigation at twice the SO_2 concentration at the low flow rate."

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit in Begasungsexperimenten quantitative Angaben über das Schadgasangebot zu machen, das in einer bestimmten Zeit auf die Pflanzen einwirkt. Erst dadurch wird es möglich sein, zu vergleichenden Aussagen über die Schädigung von Gasen zu gelangen. Die widersprüchlichen und scheinbar unverständlichen Befunde in der Literatur werden sich dann auch klären lassen.

Dieser vom Verfasser beschriebene SO_2 -Schwund in der pflanzenbestandenen Begasungskammer ist auf die Adsorption an der Pflanzenoberfläche zurückzuführen, aber auch die Diffusion von SO_2 ins Innere der Pflanzen dürfte hierfür verantwortlich sein. Der erstgenannte Grund für die SO_2 -Reduktion im Prüfraum wird durch die Ergebnisse der Freilanduntersuchungen von JÄGER (1969) gestützt. Die Schwefelanalysen der Testpflanzen an den beiden Standorten am Meteorologischen Institut (Tab.7) zeigen von der

Höhe des Standortes abhängige signifikante Differenzen im Schwefelgehalt der untersuchten Petunienblätter. Dies läßt auf eine starke Ad- und Absorption von SO_2 durch das Erdreich sowie die den Erdboden bedeckende Vegetation (in diesem Fall vorwiegend Gräser) schließen. Außerdem muß mit einem SO_2 -Höhengradient gerechnet werden wie ihn KLEE (1969) bei seinen Untersuchungen mit Flechten am selben Standort festgestellt hat.

Mit der Diffusion von SO_2 in das Pflanzengewebe haben sich immer wieder Autoren auseinandergesetzt. WIELEK (1905) hat wohl zuerst den Beweis erbracht, daß SO_2 über die Spaltöffnungen in das Innere eines Blattes einzudringen vermag. In jüngster Zeit hat auch FISCHER (1967) erneut die Beziehung zwischen SO_2 -Absorption und dem Spaltöffnungszustand festgestellt indem er eine Relation zwischen SO_2 -Absorption und Transpiration (als Maß für die Spaltöffnungsweite) gefunden hat. Die von der Pflanze aufgenommene SO_2 -Menge hängt vor allem von dem Diffusionswiderstand, d.h. der Anzahl und Spaltweite der Stomata, ab, den das Gas überwinden muß, um in das Blattinnere einzudringen. FISCHER (1967) zeigt in seinen Versuchen wie nach Ablösung der Blattepidermis sowohl die SO_2 -Absorption als auch die CO_2 -Assimilation ansteigen. Die Bedeutung der Stomata für die SO_2 -Aufnahme ist auch aus den hier dargelegten eigenen Untersuchungen über den unterschiedlichen SO_2 -Schwund in der Prüfkammer im Licht und im Dunkeln zu sehen.

Der Öffnungsvorgang der Schließzellen wird normalerweise durch Licht und den CO_2 -Gehalt der Luft ausgelöst (SCARTH 1932; HEATH and MILTHORPE 1950; KARVÉ 1961; RASCHKE 1965). Da die Versuche unter definierten Bedingungen bei optimaler Wasserversorgung über die Wurzeln ausgeführt wurden kann mit einer diesen Außenfaktoren angepaßten Spaltenweite des Stomaapparates gerechnet werden. Mit dem Einsetzen der Öffnungsbewegung nach dem Einschalten des Lichtes beginnt auch ein reger Gasaustausch mit der Umgebungsluft wie dies die CO_2 -Umsatzmessung in der Begasungskammer zeigen. Mit dem CO_2 -Austausch läuft aber auch die Möglichkeit der SO_2 -Aufnahme aus der Umgebungsluft parallel. So kann in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von FISCHER (1967) aus dem Verlauf der SO_2 -Konzentrationskurve in der Begasungskammer

bei gleichbleibender Dosierung und der CO_2 -Umsatzkurve auf das Stomaverhalten geschlossen werden.

Beim Vergleich der vom Verfasser aufgezeigten Abhängigkeit der Photosynthesedepression von der einwirkenden SO_2 -Menge auf die Testpflanzen mit den von VOGL et al. (1964) an Pinus und Picea erhaltenen Ergebnissen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Befunde, auch wenn letztere Untersuchungen nicht unter genau definierten Bedingungen im Freiland erfolgten. Dagegen sind die Untersuchungen von KELLER und MÜLLER (1958) über den Einfluß von SO_2 auf den CO_2 -Gaswechsel von Forstpflanzen unter ähnlichen Versuchsbedingungen ausgeführt worden wie die hier dargestellten Befunde. So lassen sich die Ergebnisse über die Minderung der CO_2 -Assimilation durch SO_2 gut mit einander in Einklang bringen. Durch die weitere Entwicklung von Möglichkeiten für Begasungsexperimente unter definierten Bedingungen sind die Untersuchungen von FISCHER (1967) über den Einfluß von SO_2 auf höhere Pflanzen direkt mit den eigenen in dieser Arbeit dargelegten Befunden zur Deckung zu bringen.

Das Absinken der CO_2 -Aufnahme von Petunien unter Einwirkung von Schwefeldioxid bis zur Ausbildung von sichtbaren Schäden sowie das Regenerationsvermögen der CO_2 -Assimilation nach Beendigung der SO_2 -Begasung deckt sich mit den von FISCHER an Antirrhinum-Pflanzen gemachten Beobachtungen. Ebenso gleichen sich die Befunde, daß weder zur Ausbildung von reversiblen oder irreversiblen Assimilationsdepressionen Licht erforderlich ist.

Ergänzend hierzu sei an dieser Stelle auch auf die SO_2 -Begasungsversuche mit Parmelia physodes von KLEE (1969), die in der selben Begasungsversuchsanordnung durchgeführt wurden, hingewiesen. Denn hierbei konnte ein Abbau der Assimilationspigmente (Chlorophyll a und b, β -Carotin) unter SO_2 -Einfluß sowohl mit wie ohne Licht in den Flechtenthalli festgestellt werden. In den eigenen Untersuchungen des Verfassers wurde auch eine Herabsetzung der Respiration der Petunia-Pflanzen bei SO_2 -Begasung im Dunkeln gemessen; dieses Phänomen ist in den Atmungsmessungen von KLEE (1969) an Flechtenthalli, die im Dunkeln mit SO_2 begast wurden nur sehr schwach ausgeprägt. Dagegen stellten KELLER und MÜLLER (1958) einen Anstieg der nächtlichen

Respiration von SO_2 -begasten Tannenpflanzen fest. Dieser unterschiedliche Befund ist durch die nicht konstanten Versuchsbedingungen zu erklären, da unter natürlichen Standortverhältnissen gearbeitet wurde im Gegensatz zu den eigenen hier dargelegten Respirationsmessungen im definierten Begasungsexperiment. Nach KATZ et al. (1952, zit. b. KELLER u. MÜLLER 1958) sind keinerlei Anhaltspunkte gefunden worden, daß bei Begasung mit SO_2 eine Beeinträchtigung der Respiration stattfindet.

Wieweit eine Abnahme der CO_2 -Assimilation unter SO_2 -Einfluß zugleich als Steigerung der Atmung angesehen werden kann, ist eine Frage der Interpretation der CO_2 -Registrierung im Prüfraum. Ein Ansteigen der CO_2 -Konzentration in der Begasungskammer kann einmal durch die Verminderung der pflanzlichen CO_2 -Aufnahme aber auch durch eine Steigerung der CO_2 -Abgabe also der Respiration bedingt sein.

Die vorliegenden Untersuchungen über den CO_2 -Gaswechsel von Petunia in Abhängigkeit von verschiedenen hohen SO_2 -Konzentrationen geben Auskunft über nur eine der vielen meßbaren physiologischen Veränderungen, die durch das Schwefeldioxid in der Pflanze verursacht werden. Aber gerade die CO_2 -Assimilation als ein sehr empfindlicher Lebensprozeß der Pflanze bietet einen guten Ansatzpunkt für eine Wirkungskette wie sie von STERN (1968) im Zusammenhang mit den Untersuchungen von HECK und DUNNING (1967) angedeutet wird und die durch SO_2 -Begasung ausgelöst wird bis es zu den bekannten akuten Schäden in Form von Nekrosen kommt.

Es soll nun aufgrund der eigenen Untersuchungen und in Anlehnung an die genannten Autoren ein Bild über den Wirkungsmechanismus von SO_2 aufgezeichnet werden:

Die konstanten Umweltbedingungen in der Klimakammer bewirken im pflanzlichen Organismus ein Gleichgewicht zwischen CO_2 -Umsatz und Wasserhaushalt. Daraus resultiert auch eine bestimmte Spaltenweite der Stomata. Das bereits von HEILING (1933) beschriebene Phänomen der anfänglichen Stimulierung der Transpiration durch Schwefeldioxid dürfte durch eine Permeabilitätssteigerung der Zellwandmembranen des Stomaapparates und der Interzellularwände bedingt durch die SO_2 -Einwirkung ausgelöst werden (KISLER 1968). Schon KLEMM (1956) hat aus seinen Untersuchungen geschlossen, daß sowohl die Mesophyllmembranen durch Quellungs- und

Entquellungsvorgänge als auch die Stomata durch die Spaltenweite die Transpiration beeinflussen. Diese erhöhte Wasserabgabe wirkt sich aber auf den gesamten Stoffwechsel, vor allem aber auf den CO_2 -Umsatz durch Abnahme des Turgordruckes im Blattgewebe aus. Damit ist eine Verminderung der Spaltenweite nach einem anfänglichen vorübergehendem Öffnungsvorgang (RASCHKE u. KÜHL 1969) verbunden. RASCHKE (1965) hat diese von STÄLFELT (1956) beschriebene Koppelung der hydroaktiven und -passiven mit den photoaktiven und -passiven Öffnungs- und Schließbewegungen der Stomata erneut experimentell nachgewiesen. Dieser Schließvorgang der Stomata bewirkt zugleich die Herabsetzung der CO_2 -Assimilation, die durch die meßbare Änderung der CO_2 -Konzentration in der Begasungskammer erfaßt werden kann.

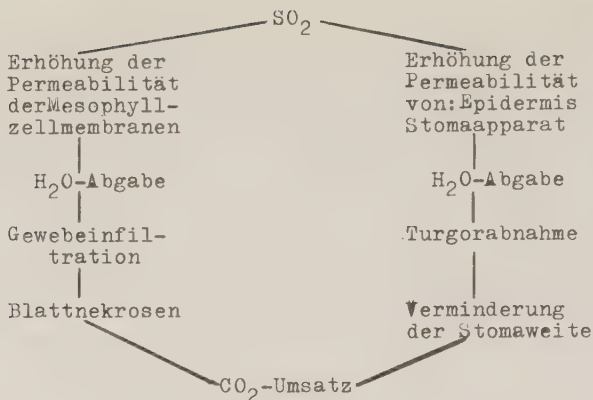
Bei länger andauernder SO_2 -Begasung im niedrigen Konzentrationsbereich oder bei kurzfristigen hohen Spitzenkonzentrationen wird aufgrund des SO_2 -Konzentrationsgefälles von außen in die Pflanze eine Diffusion von SO_2 erfolgen. Hierdurch wird die Permeabilität derart erhöht, daß Wasser aus den Mesophyllzellen in den Interzellularraum eindringt und zu dem Schadbild der infiltrierten Gewebezonen führt (STERN 1968). Die Feinstruktur und der chemische Aufbau der Zellwände bestimmen die Permeabilitätseigenschaften. Ob und welche Art von Schädigungen durch SO_2 im Blatt ausgelöst werden, hängt von der eingedrungenen Gasmenge ab, von der auch die äußerlich am Blatt auftretenden Schadsymptome bestimmt werden. Tritt das im Quellungswasser der Zellwände gelöste SO_2 im Bereich der Spaltöffnungen durch die Plasmagrenzschichten in das Plasma der Zellen, so äußert sich dies schon für das freie Auge in zahlreichen über das Blatt verstreuten nekrotischen Flecken (KISSER 1966). Nach welcher Zeit und in welchem Ausmaß Schäden an den Mesophyllzellen auftreten hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der das Gas zu den Protoplasten in den Zellen gelangt. Hierbei muß die Zellwand auf dem Wege der Lösung und der Diffusion im Quellungswasser der Wandmembranen (KISSER 1968) durchdrungen werden. Nicht nur die Dicke der Zellwand, sondern auch der Gehalt an quellungsfähigen Pektinen und Hemicellulosen mit ihren gehäuften OH- und COOH-Gruppen sowie die Dichte des Zellulosegefüges mit den zahlreichen hydrophilen OH-Gruppen sind maßgebend für die Wasserbindung in der Zellwand.

Damit wird auch die Geschwindigkeit der Zellwanddiffusion für SO_2 bestimmt. Wie KELLER (1958) und KISSER (1968) erneut berichten, steigt die Transpiration der Pflanzen unter SO_2 -Einfluß sofort an. Das Wasserdefizit in den Mesophyllzellen wird nicht mehr durch den Wassertransport über die Leitungsbahnen ausgeglichen, obwohl über das Wurzelsystem eine optimale Wasserversorgung (100 % WK der Topferde) zur Verfügung steht. Die infiltrierten Gewebezonen trocknen schließlich aus und es kommt zu dem Phänomen der Blattnekrosen.

Der Ablauf dieser Reaktionskette über einen Permeabilitätsanstieg der Zellmembranen bis zu den sichtbaren Schäden am pflanzlichen Organismus macht auch die zeitlich differierende Wirkung von SO_2 und die unterschiedliche Resistenz der Pflanzen im HelLEN und Dunkeln (ZAHN 1963) verständlich. Geht man davon aus, daß die Stomata im Dunkeln unter normalen physiologischen Bedingungen geschlossen sind, so kann das SO_2 nur aufgrund des Konzentrationsgefälles durch die Epidermis ins Blattinnere diffundieren. Hierfür sind die Untersuchungen von HECK und DUNNING (1967) auch ein guter Hinweis. Denn durch die Erhöhung des CO_2 -Gehaltes der Luft wurde ein Schließen der Spaltöffnungen im Licht bewirkt wodurch wiederum die Empfindlichkeit der Versuchspflanzen dem Schadgas gegenüber herabgesetzt wurde.

Die Diffusion von SO_2 durch die Epidermis dürfte relativ lange Zeit dauern bis eine entsprechende toxisch wirkende SO_2 -Menge durch die Cuticula eingedrungen ist, die nicht mehr durch den Stoffwechsel an anderen Orten der Pflanze in gebundener Form (WEIGL und ZIEGLER 1962; FALLER 1968) abgelagert werden kann. Hinzu kommt eine lichtabhängige Membranpermeabilität wie sie bereits von KISSELEW (1925) und STÖGER (1950) beschrieben wurde. Daraus dürfte sich auch das verzögerte Auftreten von sichtbaren Schäden bei Einwirkung von SO_2 im Dunkeln erklären lassen. Diese Reaktionskette kann schematisch in einem Blockdiagramm zusammengefaßt werden.

Der CO_2 -Gaswechsel der Pflanzen zeichnet sich als gut erfaßbare Größe eines der wichtigsten Lebensprozesse aufgrund der modernen Meßtechnik in der Früherkennung von Immissionswirkungen aus. Die Erfassung des CO_2 -Umsatzes der Pflanzen unter Schadgaseinfluß hat nicht nur wissenschaftliche Bedeutung, sondern hat vielmehr



praktischen Wert, da sie die Voraussetzung für Aussagen über die Stoffproduktion schafft, die offensichtlich durch Immissions-
einwirkungen vermindert wird und die der eigentliche Ursprung der Rauchsadensforschung war.

Hier wurde das Bild einer Reaktionskette der Wirkungsweise von SO_2 auf den CO_2 -Umsatz der Pflanzen aufgrund der eigenen CO_2 -Messungen und in Anlehnung an Literaturhinweise (STERN 1968; HECK and DUNNING 1967; FISCHER 1967) aufgezeichnet. Die Untersuchungen von FISCHER zeigen jedoch auch Möglichkeiten auf, wie SO_2 auf Coenzyme (an Hand von Vitaminbestimmungen) und auf den Energiehaushalt (Bestimmungen des ATP-Gehaltes) wirken kann.

So muß es weiteren Untersuchungen auf dem weiten Gebiet der Enzyme vorbehalten bleiben zu experimentell gesicherten Aussagen über die Wirkung von SO_2 auf diesen Komplex der Pflanzeninhaltsstoffe zu gelangen.

V. Zusammenfassung

In einer Klimakammer werden junge Pflanzen von *Petunia hybrida* hell und dunkel mit verschiedenen Schwefeldioxidkonzentrationen begast. Es werden die SO_2 -Aufnahme durch die Pflanzen und der dadurch verminderte CO_2 -Gaswechsel der Versuchspflanzen kontinuierlich gemessen. Die SO_2 -Konzentration wird durch die Leitfähigkeitsmessung erfaßt während der CO_2 -Umsatz mit Infrarotgasanalysatoren bestimmt wird.

- 1.) Die pflanzenbedingte SO_2 -Konzentrationsminderung in der Be-
gasungskammer ist in direkter Beziehung zur Geschwindigkeit
des Luftmassenwechsels in der Kammer zu setzen (Tab.1).
- 2.) Die CO_2 -Assimilation wird durch SO_2 im Licht zeitlich frü-
her und stärker reduziert als die Atmung der Pflanzen im
Dunkeln.
- 3.) Selbst geringe SO_2 -Mengen von $0,9 \text{ mg/m}^3$ (bei einem Luftwech-
sel von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ sind dies $2,7 \text{ mgSO}_2/\text{h}$) führen im Licht vorüber-
gehend zu einer Verminderung der CO_2 -Assimilation.
- 4.) Bei ausreichender Zeitintervalldauer zur Erholung des Assi-
milationsvermögen der Pflanzen werden Spitzenkonzentrationen
bis zu $9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ (dies sind bei einem Luftwechsel von
 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ $27 \text{ mg SO}_2/\text{h}$) ohne eine bedeutende dauernde Abnahme
der CO_2 -Assimilation von *Petunia hybrida* toleriert.
- 5.) Bei einer Depression der apparenten Photosynthese durch SO_2
bis oder unter die Kompensationslage kommt es zu sichtbaren
Schäden in Form von infiltrierten Gewebezonen, die sich dann
zu Nekrosen entwickeln..
- 6.) Die Versuchsergebnisse werden mit den einschlägigen Litera-
turangaben verglichen und anschließend wird die Möglichkeit
einer Reaktionskette über die Einwirkung von Schwefeldioxid
auf den CO_2 -Gaswechsel von Pflanzen diskutiert.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

ANDRÉ, A.: Untersuchungen über die Einwirkungen von schwefeliger Säure auf Blattzellen. Diss. Bonn 1934

BÖRLITZ, S.: Physiologische und biochemische Beiträge zur Rauchsadenschadensforschung. Biol. Zbl. 83, 501-513 (1964)

BRENNAN, E. and I.A. LEONE: The response of plants to sulfur dioxide or ozone pollutes air supplied at varying flow rates. Phytopathology 58, 1661-1664 (1968)

BUCK, M.: Geeignete Methoden zur Bestimmung des Gesamtschwefelgehaltes pflanzlicher Substanzen. Landwirtschaftl. Forsch. 15, 135-145 (1962)

DÄSSLER, H.-G.: Die Einwirkung von Schwefeldioxid auf verschiedene Pflanzeninhaltsstoffe. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 11, 567-569 (1962)

DÖRRIES, W.: Über die Brauchbarkeit der spektroskopischen Phäophytinprobe in der Rauchsaden-Diagnostik. Z. Pflanzenkrankh. (Pflanzenpath.) Pflanzenschutz 42, 257-273 (1932)

DUGGER, W. M., TAYLOR, J. O. C., CARDIFF, E. and THOMPSON, C. R.: Stomatal action in plants as related to damage from photochemical oxidants. Plant Physiol. 37, 487-491 (1962)

EGLE, K. und ERNST, A.: Die Verwendung des Ultrarot-Absorptionsschreibers für die vollautomatische und fortlaufende CO₂-Analyse bei Assimilations- und Atmungsmessungen an Pflanzen. Zeitschr. f. Naturforschung 4b, 351 (1949)

EHRLER, W. K., F. S. NAKAYAMA and C. H. M. VAN BAVEL: Cyclic changes in water balance and transpiration of cotton leaves in a steady environment. Physiol. Plant. 18, 766-775 (1965)

FALLER, N. N.: Der Schwefeldioxidgehalt der Luft als Komponente der Schwefelversorgung der Pflanze. Diss. Giessen 1968

FISCHER, K.: Cytologische und physiologische Wirkungen von Schwefeldioxid auf höhere Pflanzen. Diss. Darmstadt 1967

FREY-WYSSLING, A. und ELSA HÄUSERMANN: Über die Auskleidung der Mesophyllinterzellularen. Ber. schweiz. bot. Ges. 51, 430 (1941)

GARBER, K.: Luftverunreinigung und ihre Wirkungen. Berlin-Nikolassee 1967

GROTE, W. und KREKELER, H.: Die quantitative Bestimmung von Schwefel und Halogen in verbrennlichen Stoffen. Angew. Chemie 46, 106-109 (1933)

GUDERIAN, R. und STRATMANN, H.: Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation. I. Teil: Übersicht zur Versuchsmethodik und Versuchsauswertung. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1118 (1962)

GUDERIAN, R.: Luftverunreinigungen und Pflanzenschutz. Zeitschrift f. Pflanzenkrankh. (Pflanzenpathologie) und Pflanzenschutz 73, 241-265 (1966)

GUDERIAN, R. und STRATMANN, H.: Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation. III. Teil: Forschungsbericht Nr. 1920 des Landes Nordrhein-Westfalen (1968)

HASELHOFF, E.: Untersuchungen über die bei der Zersetzung des Kalkstickstoffs entstehenden gasförmigen Verbindungen und ihre Einwirkung auf das Pflanzenwachstum. Landw. Vers. Stat. 68, 189-228 (1908)

HAUT, H. van: Die Analyse von Schwefeldioxidwirkungen auf Pflanzen im Laboratoriumsversuch. Staub 21, 52-56 (1961)

HECK, W. W. and J. A. DUNNING: The effects of ozone on tobacco and pinto bean as conditioned by several ecological factors. J. Air Poll. Contr. Assoc. 17, 112-114 (1967)

HEATH, O. V. S. and F. L. MILTHORPE: Studies in stomatal behaviour. V. The role of carbon dioxide in the light response of stomata. Part II. Preliminary experiments on the inter-relations of light intensity, carbon dioxide concentration and rate of air flow in controlling the movement of wheat stomata. J. exp. Bot. 1, 227-243 (1950)

HEATH, O. V. S.: The water relations of stomatal cells and the mechanism of stomatal movement. In: F. C. STEWARD, Plant Physiology II, 193-250 (1959) New York, London

HEATH, O. V. S.: Light and carbon dioxide in stomatal movements. In: Handbuch der Pflanzenphysiologie XVII/1, 415-464, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959

HEILING, A.: Untersuchungen über den Einfluß gasförmiger Luftverunreinigungen auf die pflanzliche Transpiration nebst einigen Voruntersuchungen zur üblichen Methodik der Transpirationsbestimmungen. Phytopatholog. Zeitschr. 5, 435-492 (1933)

HÖLTE, W.: Zur Kenntnis von Wesen und Erscheinungsformen der Schwefligsäureeinwirkung auf die Pflanzenwelt. Zeitschr. Pflanzenkrankh. 65, 32-36 (1958)

HUBER, B.: Registrierung des CO_2 -Gefälles und Berechnung des CO_2 -Stromes über Pflanzengesellschaften mittels Ultrarot-Absorptionsschreiber. Ber. dtsh. Bot. Ges. 63, 53-64 (1950)

JÄGER, H. J.: Untersuchungen zur Methodik der Schwefelbestimmung und deren Anwendung bei immissionsbeeinflussten Pflanzen. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit Giessen 1969

JÄGER, H. J. und L. STEUBING: Fraktionierte Schwefelbestimmungen von Pflanzenmaterial zur Beurteilung einer SO_2 -Einwirkung. Z. angew. Bot. im Druck 1970

KARVE, A.: Die Wirkung verschiedener Lichtqualitäten auf die Öffnungsbewegungen der Stomata. Z. f. Bot. 49, 47-72 (1961)

KATZ, M.: Sulfur dioxide in the atmosphere and its relation to plant life. Ind. Eng. Chem. 41, 2450-2465 (1949)

KELLER, H.: Beiträge zur Erfassung der durch schweflige Säure hervorgerufenen Rauchschäden an Nadelhölzern. Untersuchungen des SO_2 -Gehaltes der Luft in der Umgebung von Emmissionsquellen. Beihefte z. Forstwiss. Cbl. 10, 5-37 (1958)

KELLER, H. und MÜLLER, J.: Untersuchungen über den Einfluß von Schwefeldioxid auf den Gaswechsel von Forstpflanzen. Beihefte z. Forstwiss. Cbl. 10, 38-63 (1958)

KESSEN, G.: Zur Bestimmung des Schwefelgehaltes in organischen Substanzen. Landwirtschaftl. Forsch. 16, 284-290 (1963)

KETELLAPPER, H. J.: Stomatal physiology. Ann. Rev. Plant. Physiol. 14, 249-270 (1963)

KISSELEW, N.: Veränderungen der Durchlässigkeit der Schließzellen im Zusammenhang mit stomatären Bewegungen. Beih. bot. Zentralbl. 41, 287-308 (1925)

KISSER, J.: Forstliche Rauchschäden aus der Sicht des Biologen. Mitt. Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn 73, 7-48 (1966)

KISSER, J.: Physiologische Probleme der Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Vegetation. Ref. d. 6. Int. Arbeitstagung forstl. Rauchschadensachverständiger, Katowice 9.-14.IX. 1968

KLEE, R.: Die Wirkung von gas- und staubförmigen Immissionen auf Respiration und Inhaltsstoffe bei *Parmelia physodes*. Diss. Giessen 1969

KLEMM, G.: Untersuchungen über den Transpirationswiderstand der Mesophyllmembranen und seine Bedeutung als Regulator für die stomatäre Transpiration. *Planta* 47, 547-587 (1956)

KOK, B.: Efficiency of photosynthesis. In: *Handbuch der Pflanzenphysiologie V*, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960

LINSBAUER, K.: Beiträge zur Kenntnis der Spaltöffnungsbewegungen, *Flora* 9, 100-143 (1916)

MATERNA, J.: Einfluß des Schwefeldioxids auf die mineralische Zusammensetzung der Fichtennadeln. *Naturwiss.* 48, 723-724 (1961)

MATERNA, J.: Die Schwefeldioxideinwirkung auf die mineralische Zusammensetzung von Fichtennadeln. *Arb. d. forstl. Forschungsanst. d. Tschechoslowakei* 24, 7-36 (1962), ref. in *Staub* 23, 293 (1963)

MATERNA, J. und R. KOHOUT: Die Absorption des Schwefeldioxids durch die Fichte. *Naturwiss.* 50, 407 (1963)

MIDDLETON, J. T., EMIK, L. O. and TAYLOR, O. C.: Air quality criteria and standards for agriculture. *J. Air Poll. Contr. Assoc.* 15, 476 (1965)

MÜLLER, J.: Spezifischer Nachweis von SO₂-Rauchschäden an Pflanzen mit Hilfe von Blattpigmentanalysen. *Naturwiss.* 44, 453 (1957)

NUERNBERGK, E. L.: Zur Technik der vergleichenden Messung der Photosynthese mittels Uras und ihre Anwendung auf die Untersuchung periodischer Photosynthesekurven. *Gartenbauw.* 2, 58-91 (1955)

PAPPENHEIM: *Verh. d. Ver. z. Förderung d. Gewerbebl. i. Preußen* 65, 73 (1865)

PÄTAU, K.: Zur statistischen Beurteilung von Messungsreihen
Biol. Cbl. 63, 152-168 (1943)

RASCHKE, K.: Die Stomata als Glieder eines schwingungsfähigen
CO₂-Regelsystems; Experimenteller Nachweis an Zea mays
Zeitschr. f. Naturforsch. 20b, 1261-1270 (1965)

RASCHKE, K. und U. KÜHL: Stomatal responses to changes in
atmospheric humidity and water supply; Experiments with leaf
section of Zea mays in CO₂-free air. Planta 87, 36-48
(1969)

RÖBEN, M.: Über die Phäophytinbildung in Blattorganen nach
Hitze- und Kältewirkung. Kleine Mitt. Ver. Wasser-, Boden-
und Lufthygiene, Berlin-Dahlem, 9, 194-206 (1933)

RUSTON, A. und Ch. CROWTHER: Impurities in the atmosphere of
towns and their effects upon vegetation. Rep. Brit. Assoc.
Advanc. Sci. Sheffield 577-578 (1910)

SCARTH, G. W.: Mechanism of the action of light and other
factors on stomatal movement. Plant Physiol. 7, 481-504
(1932)

SCARTH, G. W. and M. SHAW: Stomatal movement and photosynthesis
in Pelargonium; I. Effects of light and carbon dioxide. Plant
Physiol. 26, 207-225 (1951)

SCHROEDER, v. J. und REUSS, C.: Die Beschädigung der Vegetation
durch Rauch und die Oberharzger Hüttenrauchschäden. Berlin 1883

STÄLFELT, M. G.: The stomata as a hydrophotic regulator of the
water deficit of the plant. Physiol. Plant. 8, 572-593
(1955)

STÄLFELT, M. G.: Die stomatäre Transpiration und die Physiologie
der Spaltöffnungen. In: Handbuch der Pflanzenphysiologie II,
351-426, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956

STÄLFELT, M. G.: Gifte Krankheiten. In: Handbuch der Pflanzen-physiologie V/2, 152-155, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960

STERN, A. C.: Air Pollution, New York & London 1968

STOKLASA, J.: Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch und Fabrikexhalation, Berlin-Wien 1923

STÖGER, Eva-Maria: Zur Permeabilität der Schließzellen. Protoplasma 39, 588-596 (1950)

STÖCKHARDT, J. A.: Untersuchungen über die schädliche Einwirkung des Hütten- und Steinkohlenrauches auf das Wachstum der Pflanzen, insbesondere der Fichte und Tanne. Tharandter Forstl. Jahrbuch 21, 218-254 (1871)

THOMAS, A. D. and HILL, G. R.: Relation of sulphurdioxide in the atmosphere to photosynthesis and respiration of alfalfa. Plant Physiol. 12, 309-383 (1937)

THOMAS, M. D., HENDRICKS, R. H. and HILL, G. R.: The sulfur metabolism of plants and the effects of sulfur dioxide on vegetation. Ind. Eng. Chem. 42, 2231-2235 (1950)

THOMAS, M. D.: Gas damage to plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 2, 293-322 (1951)

TRANQUILLINI, W.: Der Ultrarot-Absorptionsschreiber im Dienste ökologischer Messung des pflanzlichen CO₂-Umsatzes. Ber. d. dtsh. Bot. Ges. 65, 102-112 (1952)

TURNER, E. und R. CHRISTISON: Über die Wirkung der giftigen Gase auf Pflanzen. Pogg. Annal. d. Phys. 14, 259-73 (1828)

VOGL, M., BÖRLITZ, S. und POLSTER, H.: Physiologische und biochemische Beiträge zur Rauchsadensforschung. Der Einfluß stoßartiger, starker SO₂-Begasung auf die CO₂-Absorption und einige Nadelinhaltsstoffe von Fichte (Picea abies) und Bergkiefer (Pinus mugo) unter Laboratoriumsbedingungen. Archiv f. Forstw. 13, 1031-1043 (1964)

WALTER, H.: Standortsllehre. Stuttgart 1960

WORLD HEALTH ORGANIZATION: Die Verunreinigung der Luft.
Weinheim 1964

WEIGL, J. und ZIEGLER, H.: Die räumliche Verteilung von ^{35}S
und die Art der markierten Verbindungen in Spinatblättern
nach Begasung mit $^{35}\text{SO}_2$. Planta 58, 435-447 (1962)

WEISS, K.: Informationsdruckschrift Nr. Kp 7.0.0.1/26691
Giessen 1969

WENTZEL, K. F.: Empfindlichkeit und Resistenzunterschiede der
Pflanzen gegenüber Luftverunreinigungen. Forstarch. 39, 189-194
(1968)

WIELER, A.: Untersuchungen über die Wirkung schwefliger Säure
auf die Pflanzen. Berlin 1905

WIELER, A.: Über Beziehungen zwischen der schwefligen Säure und
der Assimilation. Ber. d. dtsh. Bot. Ges. 34, 523 (1916)

WISLICENUS, H.: Sammlung von Abhandlungen über Abgase und
Rauchschäden. Berlin 1914

ZAHN, R.: Wirkungen von Schwefeldioxid auf die Vegetation; Er-
gebnisse aus Begasungsversuchen. Staub 21, 56-60 (1961)

ZAHN, R.: Untersuchungen über die Bedeutung kontinuierlicher
und intermittierender Schwefeldioxidwirkung für die Pflanzen-
reaktion. Staub 23, 343-352 (1963)

ZAHN, R.: Über Schwefeldioxid-Wirkungsgrenzen für Pflanzen.
Staub 29, 375-376 (1969)

ZINKERNAGEL, H.: Über den Nachweis von Säureschädigungen grüner
Pflanzenzellen. Kleine Mitt. Ver. Wasser-, Boden- und Lufthygiene.
Berlin-Dahlem 14, 29-33 (1938)

Lebenslauf

Am 23. Juli 1941 wurde ich in Altstädten/Allgäu als fünftes Kind des Studienrates Dr. phil. Rudolf Heinz Kühl und seiner Gemahlin Dr. phil. Hermine Kühl, geb. Richter, geboren. Nach dem Besuch der Grundschule von 1947 bis 1951 in Altstädten wechselte ich in die damals "Gemeindliche Oberrealschule" nach Oberstdorf über. Von Oktober 1954 an besuchte ich das "Schiller-Gymnasium" in Hameln, an dem ich im März 1961 mein Reifezeugnis erwarb.

Mit dem Sommersemester 1961 begann ich an der Universität in Innsbruck mein Biologiestudium. Von 1962 an studierte ich an der Justus Liebig-Universität in Giessen und habe im Oktober 1967 mit einer Arbeit über "Stomatabewegungen von *Zea mays* in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Wasserversorgung. Versuche in CO₂-freier Luft.", die ich unter der Anleitung von Prof. Dr. K. Raschke anfertigte, die Diplomprüfung für Studierende der Biologie abgelegt. Während der letzten drei Jahre meiner Studienzeit in Giessen war ich in der studentischen Selbst- und Mitverwaltung auf fachlicher Ebene im örtlichen, überregionalen und internationalen Bereich tätig.

Von Oktober 1967 bis 31. März 1969 war ich im Rahmen eines Forschungsauftrages "Einfluß der Luftverunreinigung auf Flora und Mikroflora" des Bundesministeriums für Gesundheitswesen als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Botanischen Institut der Justus Liebig-Universität tätig. Seit 1. April 1969 bin ich wissenschaftlicher Angestellter des Institutes für Wasser-Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes zur Leitung der Versuchsstation in Hattersheim.

Meine akademischen Lehrer, die den Verlauf meines Hochschulstudiums entscheidend beeinflusst haben, waren: Prof. Dr. W. E. Ankel (Zoologie), Prof. Dr. D. v. Denffer (Botanik), Prof. Dr. H. Gams (Botanik), Prof. Dr. W. P. Neumann (Organische Chemie), Prof. Dr. K. Raschke (Botanik), Prof. Dr. L. Steubing (Pflanzenökologie).

